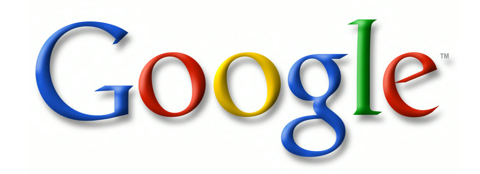
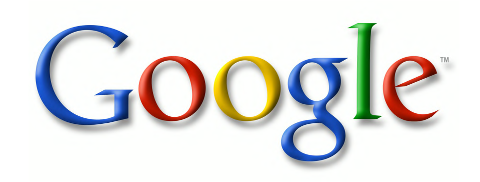




BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

R. THURSTON

HISTOIRE DE LA MACHINE A VAPEUR

★ ★





BIBLIOTHÈQUE

SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. ÉM. ALGLAVE

XXXIII

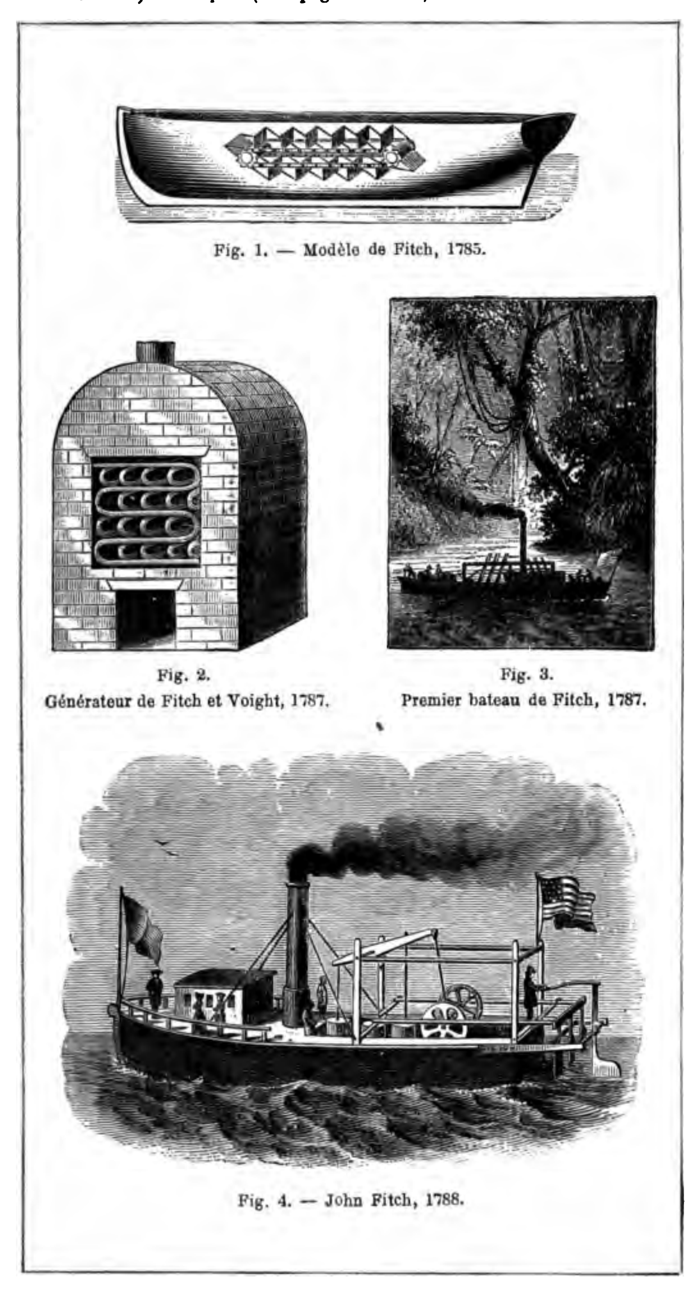


Fig. 1. — Modèle de Fitch, 1785.

Fig. 2.
Générateur de Fitch et Voight, 1787.

Fig. 3.
Premier bateau de Fitch, 1787.

Fig. 4. — John Fitch, 1788.



HISTOIRE

DE LA

MACHINE A VAPEUR

PAR

R.-H. THURSTON

Professeur de mécanique à l'institut polytechnique Stevens
à Hoboken, près New-York.

REVUE, ANNOTÉE ET AUGMENTÉE D'UNE INTRODUCTION

par

J. HIRSCH

Professeur de machines à vapeur à l'École des Ponts et Chaussées
de Paris.

Avec 140 figures dans le texte, et 16 planches tirées à part.

TOME SECOND

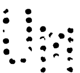
PARIS

LIBRAIRIE GERMER BAILLIÈRE ET Cie

108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 108

Au coin de la rue Hautefeuille.

1880



cation de la force de la vapeur; mais elles ne réussirent pas, et le navire à vapeur est une création du XIX[e] siècle. C'est seulement dans les premières années de ce siècle, après Newcomen et Watt, qu'un certain succès pratique a couronné les efforts faits dans cette direction. Il n'y a même pas encore bien des années que la traversée de l'Atlantique s'effectuait souvent sur des bâtiments à voiles; elle était dangereuse, fatigante, irrégulière. Maintenant il se passe à peine un jour sans que plusieurs vastes et puissants steamers quittent les quais de New-York et de Liverpool pour faire le même voyage; il s'accomplit avec une sécurité, une régularité telles, que les passagers peuvent compter en toute confiance sur leur arrivée au jour fixé, et qu'il leur est possible de franchir l'Océan sans danger et commodément, même au milieu des tempêtes de l'hiver, Pourtant les progrès énormes réalisés dans la navigation à vapeur, et l'immense extension qu'elle a prise, sont uniquement l'œuvre du siècle actuel : un tel résultat est bien de nature à nous frapper d'étonnement et d'admiration.

L'histoire du développement de la navigation à vapeur est éminemment propre à mettre en lumière cette croissance graduelle, que nous avons déjà retrouvée dans toute l'histoire de la machine à vapeur; ici nous pouvons en suivre la marche pas à pas, depuis les systèmes les plus primitifs et les plus grossiers jusqu'aux dispositifs les plus récents et les plus parfaits, lesquels nous présentent les types les mieux réussis de la machine thermique qu'on ait encore vus, même dans l'état aujourd'hui si avancé des arts mécaniques, qu'on la considère au point de vue de ses organes et de sa construction matérielle, ou comme la plus haute application des principes scientifiques connus.

La roue à palettes fut employée de très bonne heure pour remplacer les rames, et l'on peut trouver dans l'ouvrage de Fammelli : *De l'artificioses machines*, publié en vieux français en 1588, une description, curieusement illustrée par une grande gravure sur bois, des roues à palettes

appliquées aux vaisseaux. Clark[1] cite, d'après l'édition de l'*Odyssée* d'Ogilby, un passage qui semble comme une prophétie, et laisserait presque croire que, dans ces temps antiques, un millier d'années avant l'ère chrétienne, le grand poète avait connaissance des navires à vapeur. Un prince, s'adressant à Ulysse, lui dit :

Nous avons su donner une âme à nos vaisseaux;
Désormais sans pilote ils glissent sur les eaux.
A travers le brouillard obscur, la mer profonde,
D'un pas rapide et sûr ils parcourent le monde,
Du perfide Océan sans craindre les dangers.

Dans sa traduction[2], Pope a rendu, comme il suit, cette prophétie d'Homère :

So shalt thou instant reach the realm assigned,
In wondrous ships, self-moved, instinct with mind;
. . . .
Though clouds and darkness veil the encumbered sky,
Fearless, through darkness and through clouds they fly.
Though tempests rage, though rolls the swelling main,
The seas may roll, the tempests swell in vain;
E'en the stern god that o'er the waves presides,
Safe as they pass and safe repass the tide,
With fury burns; while, careless, the convey
Promiscuous every guest to every bay[3].

1. *Steam and the Steam-Engine.*
2. *Odyssey,* Book VIII, p. 175.
3. Nous n'avons naturellement pas à traduire ici ces vers de Pope, qui ne sont eux-mêmes que la traduction, aussi magnifique que peu littérale, du texte d'Homère, correspondant aux cinq vers d'Ogilby, rendus plus haut assez exactement par un nombre égal de vers français.

Voici du reste, d'après la traduction en prose de Dugas-Montbel, le passage de l'*Odyssée* auquel il est fait allusion, et qui, soit dit en passant, semblerait plutôt se rapporter à la connaissance de la boussole qu'à celle de la machine à vapeur : « Dites-moi quel est votre pays, votre peuple, votre ville, afin que de leur propre mouvement nos vaisseaux vous y conduisent. Les navires phéaciens n'ont point de pilotes, point de gouvernails, toutes choses qu'ont les autres navires; mais ils savent les pensées et les désirs des hommes, et connaissent les villes et les champs fertiles de tous les mortels; ils sillonnent avec rapidité les vagues de la mer, toujours enveloppés dans l'ombre et les nuages; ils n'ont aucune crainte d'éprouver quelque dommage, ni de périr. » (*Odyssée,* chant VIII, p. 160-161, édition de Firmin-Didot, 1834.) *(N. du tr.)*

On rapporte que l'armée romaine, commandée par Claudius Caudex, fut transportée en Sicile dans des bateaux mus par des roues à palettes, que faisaient tourner des bœufs. Vulturius donne des dessins de ces navires.

Peut-être cette application de la puissance de la vapeur a-t-elle été prévue, il y a six cents ans, par le savant moine franciscain Roger Bacon, qui, dans un siècle d'ignorance et de torpeur intellectuelle, écrivait ces lignes :

« Je mentionnerai maintenant de merveilleux produits de l'art et de la nature, dans lesquels il n'y a rien de magique, et que la magie ne pourrait créer. On peut faire des instruments au moyen desquels les plus grands vaisseaux, avec un seul homme pour les diriger, marcheront avec une vitesse plus grande que s'ils étaient remplis de matelots, etc., etc. »

La prophétie poétique de Darwin fut publiée bien des années avant que la machine de Watt en eût rendu possible l'accomplissement partiel ; ainsi, longtemps avant le premier effort heureux, l'esprit des hommes les plus intelligents se trouvait déjà prêt à apprécier l'invention dès qu'elle paraîtrait.

Les auteurs espagnols réclament, comme nous l'avons dit, pour Blasco de Garay, l'honneur d'avoir le premier tenté de faire mouvoir un navire par la vapeur, dans le port de Barcelone, en 1543. Le document qui rapporte ce fait, et qu'on présente comme provenant des archives espagnoles de Simancas, dit que le bâtiment jaugeait 200 tonneaux et qu'il était mû par des roues à palettes ; il ajoute que les spectateurs virent, bien qu'on ne leur eût pas permis d'examiner de près le moteur, qu'un de ses éléments était un « vase d'eau bouillante » ; et enfin que l'on fit des objections à l'emploi de cet organe de la machine, à cause des dangers d'explosion.

Cette histoire semble quelque peu apocryphe, et l'affaire, en tout cas, n'eut certainement aucun résultat utile.

Dans un mémoire anglais anonyme, publié en 1651, et que Stuart suppose avoir été écrit par le marquis de Worcester, on parle assez vaguement de quelque chose qui peut

avoir été la machine à vapeur, et on assure que l'instrument décrit est susceptible d'être utilement appliqué à la propulsion des navires.

En 1690, Papin proposa d'atteler sa machine à piston sur des roues à palettes pour faire marcher les bâtiments; et en 1707 il appliqua la machine à vapeur, qu'il avait proposée pour les épuisements, à la propulsion d'un modèle de bateau sur la Fulda près de Cassel. Dans cet essai, il employait la combinaison dont nous avons donné un dessin; sa pompe élevait l'eau nécessaire pour faire mouvoir une roue hydraulique, laquelle à son tour faisait tourner les palettes. On peut trouver un compte rendu manuscrit des expériences de Papin, dans sa correspondance avec Leibnitz, que l'on conserve à la bibliothèque royale de Hanovre. Le professeur Joy y a découvert la lettre suivante[1] :

« Denis Papin, conseiller et médecin de Son Altesse Royale l'électeur de Cassel, et aussi professeur de mathématiques à Marburg, est sur le point de faire partir un bateau d'une construction particulière, qui descendra le Weser jusqu'à Brême. Comme il apprend que tous les bateaux venant de Cassel, ou d'un point quelconque de la Fulda, n'ont pas le droit d'entrer dans le Weser, mais sont obligés de décharger à Münden; et comme il prévoit quelque difficulté, quoique ces bateaux aient une destination toute différente, le sien n'étant pas fait pour porter des marchandises, il demande très humblement qu'une autorisation gracieuse soit accordée à son vaisseau de traverser librement le domaine électoral, laquelle pétition j'appuie très humblement.

« Hanovre, le 13 juillet 1707. » « G. W. Leibnitz. »

Cette lettre fut renvoyée à Leibnitz, avec la note suivante:

« Les conseillers électoraux ont trouvé de sérieux inconvénients à accorder la demande faite dans la pétition ci-dessus; et, sans indiquer leurs motifs, ils m'ont chargé de vous informer de leur décision, et de vous faire connaître

1. *Scientific American*, 24 février 1877.

qu'en conséquence la requête n'est pas agréée par Son Altesse Électorale.

« Hanovre, 25 juillet 1707. » « H. Reiche. »

Ce refus opposé à la pétition de Papin porta un coup mortel aux efforts qu'il faisait pour inaugurer la navigation à vapeur. Quelques stupides bateliers, croyant voir dans ce steamer embryonnaire la ruine de leur industrie, se jetèrent pendant la nuit sur le bâtiment et le mirent en pièces. Papin ne réussit qu'à grand'peine à sauver sa vie et s'enfuit en Angleterre.

En 1736, Jonathan Hulls prit un brevet anglais pour

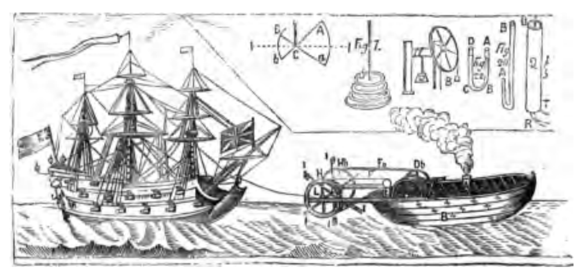


Fig. 72. — Bateau à vapeur de Hulls. 1736.

l'emploi d'une machine à vapeur comme propulseur des vaisseaux. En 1737, il publia un mémoire très bien rédigé, où il décrivait cette machine. La figure 72 est un fac-similé, à échelle réduite, du dessin joint à ce travail.

Hulls proposait de se servir de la machine de Newcomen, en l'armant d'un contrepoids et d'un système de cordes et de poulies à gorge, qui, par l'intermédiaire d'engrenages, produisaient un mouvement de rotation continu. Son bateau devait servir de remorqueur. Il dit dans sa description : « En quelque partie convenable du bateau remorqueur est placé un récipient rempli d'eau environ aux 2/3, et fermé par en haut ; et ce récipient, étant tenu bouillant, raréfie l'eau en vapeur ; cette vapeur, étant amenée par un gros tuyau dans un vase cylindrique et là condensée, produit un vide, qui fait presser le poids de l'atmosphère sur

ce vase, et ainsi fait descendre un piston ajusté dans ce vase cylindrique, de la même manière que dans la machine de M. Newcomen, avec laquelle il élève l'eau par le moyen du feu.

« P, tuyau allant du fourneau au cylindre; Q, cylindre où la vapeur est condensée; R, soupape qui empêche la vapeur d'entrer dans le cylindre, pendant la condensation de celle qu'il contient; S, tuyau pour amener dans le cylindre l'eau qui doit produire la condensation; T, robinet pour laisser entrer cette eau dans le cylindre quand il est plein de vapeur et que la soupape P est fermée; U, corde fixée au piston qui monte et descend dans le cylindre.

« *Note*. Cette corde U est la même qui s'enroule autour de la roue D, dans la machine. »

Dans le grand compartiment de la figure, A est la cheminée; B est le bateau-remorqueur; C C, cadre qui porte la machine; D*a*, D et D*b* sont trois roues portant les cordes M, F*b* et F*a*; M étant la corde U de la petite figure 30[1]. H*a* et H*b* sont deux roues montées sur l'arbre à palettes II, et munies de tiges disposées de façon à faire tourner toujours les palettes dans le même sens, bien que le mouvement de ces roues elles-mêmes soit alternatif; F*b* est une corde qui relie les roues D*b* placées dans le bateau avec celles qui se trouvent à l'arrière.

Hulls ajoute :

« Quand le poids G est ainsi élevé, pendant que les roues D*a*, D et D*b*, se meuvent en arrière, la corde F*a* cède et la force du poids G fait tourner en avant la roue H*a* et les palettes avec elle; de manière que ces palettes continuent toujours de marcher en avant, quoique les roues D*a*, D et D*b* se meuvent en avant et en arrière, suivant que le piston descend ou monte dans le cylindre. LL sont des dents où vient s'engrener un cliquet tombant de

1. Laquelle petite figure 30 n'a pas été reproduite dans le dessin ci-dessus, qui ne représente évidemment qu'une partie de celui de l'ouvrage original. On voit ici une figure 22, une figure 20, une figure 7, etc.; mais il doit en manquer bien d'autres. *(N. du tr.)*

l'axe, et elles sont disposées de façon à entrer en prise alternativement pour faire mouvoir les palettes toujours en avant; car la roue H*a* travaille sous l'action du poids G, pendant que l'autre roue H*b* retourne en arrière afin de recommencer une course nouvelle.

« *Note.* Le poids G ne doit égaler que la moitié du poids de la colonne d'air pressant sur le piston, parce que ce poids G est soulevé en même temps que la roue H*b* travaille; de sorte qu'on a en réalité deux machines agissant alternativement par le poids d'une colonne d'air d'un diamètre égal à celui du cylindre. »

L'inventeur propose l'emploi de poutres en bois pour protéger les roues contre les chocs extérieurs; et dans les eaux basses il recommande de fixer aux arbres à palettes des crampons « pour prendre appui sur une pièce de bois placée au fond de la rivière, ce qui poussera le vaisseau en avant avec d'autant plus de force ». Il conclut : « Ainsi je me suis efforcé de donner un exposé clair et satisfaisant de la machine que j'ai nouvellement inventée, pour remorquer des vaisseaux à l'entrée ou à la sortie d'un port, havre ou rivière quelconque, contre vent et marée ou par un temps calme; et je ne doute pas que quiconque se donnera la peine de parcourir cet essai n'ait la loyauté d'excuser ou d'oublier telles imperfections dans la diction ou le style, considérant de quelle main il provient, si ce que j'ai imaginé peut seulement paraître aux autres aussi clair qu'à moi-même, à savoir : que le projet présenté par moi maintenant est praticable et sera utile s'il est encouragé. »

On n'a pas de preuve positive que Hulls ait jamais soumis son système à l'épreuve de l'expérience, quoique la tradition raconte qu'il fit un modèle dont les essais donnèrent de si mauvais résultats, qu'il renonça à pousser plus loin ses études; et il existe encore des couplets burlesques chantés par ses voisins pour se moquer de ce qu'ils appelaient sa folie.

En 1752, un prix fut accordé par l'Académie des sciences de France, pour le meilleur essai sur la manière de faire marcher les navires sans le secours du vent. Bernoulli

l'obtint pour un mémoire où il proposait des roues à palettes disposées comme les ailes d'un moulin à vent, — de véritables hélices, — dont une devait être placée de chaque côté du bâtiment et deux autres à l'arrière. Pour un navire de 100 tonnes, il proposait un arbre de 14 pieds de long et 2 pouces de diamètre, portant « 8 roues, pour agir sur l'eau, à chacune desquelles il est perpendiculaire et dont il forme l'axe commun ; les roues devraient être à des distances égales l'une de l'autre. Chaque roue est formée de 8 bras de fer, chacun de 3 pieds de long, de sorte que le diamètre total de la roue est de 6 pieds. Chacun de ces bras, à la distance de 20 pouces du centre, porte une plaque de tôle ou palette de 16 pouces carrés, inclinée de façon à former un angle de 60° tant avec l'arbre qu'avec la quille du bâtiment, parallèlement à laquelle l'arbre est placé. Pour supporter cet arbre et les roues, 2 fortes barres de fer, épaisses de deux à trois pouces, sont fixées perpendiculairement aux flancs du navire, à environ 2 pieds et demi au-dessous de la surface de l'eau. » Il proposait d'adapter à l'arrière de semblables propulseurs à hélice et de les mouvoir au moyen d'animaux ou par la vapeur[1].

Mais Figuier cite un essai plus remarquable encore : le travail de l'abbé Gauthier, publié dans les *Mémoires de la Société royale des sciences et lettres de Nancy*. Bernoulli avait exprimé l'opinion que la meilleure machine alors connue, celle de Newcomen, n'était pas supérieure à quelques autres moteurs. Gauthier proposa d'employer cette machine à faire mouvoir des roues à palettes placées sur les flancs du bâtiment. Son système ne fut pas mis en pratique ; mais son mémoire contenait une description

1. Le mémoire dont il est question ici est sans doute celui de Daniel Bernoulli, couronné en 1753 par l'Académie des sciences de Paris. Ce mémoire est imprimé dans le *Recueil des pièces qui ont remporté les prix*, tome VII, publié en 1769. Nous n'avons pu y retrouver ni les chiffres ni les dispositifs mentionnés dans le texte ci-dessus ; ce mémoire ne renferme que des calculs, assez développés du reste et fort hypothétiques, sur des inventions de l'auteur n'ayant aucun rapport avec l'hélice.

(Note du traducteur.)

enthousiaste des avantages qu'il devait procurer. Il expose qu'une galère, mue par 26 rames de chaque côté, ne faisait que 4,320 toises (8,420^{m}) à l'heure et nécessitait un équipage de 260 hommes. Une machine à vapeur faisant le même travail serait prête à fonctionner en toutes circonstances; et, quand elle ne servirait pas à faire mouvoir le vaisseau, elle pourrait être appliquée à lever l'ancre, à manœuvrer les pompes, à renouveler l'air, pendant que son fourneau servirait aussi pour la cuisine. La machine occuperait moins de place et pèserait moins que les hommes, consommerait moins d'aliments et des aliments moins coûteux, etc. Il mettrait la chaudière à l'abri des explosions au moyen de bandes de fer. Le fourneau serait en fer avec un cendrier plein d'eau et reposerait sur une caisse plate également remplie d'eau. L'eau d'injection devait être puisée dans la mer et y retourner par un tuyau de décharge débouchant au-dessus de la ligne de flottaison. Les chaînes reliant habituellement l'extrémité du balancier aux tiges des pompes devaient s'enrouler sur des roues portées par l'arbre à palettes, et munies de tringles commandant un engrenage. De cette façon les palettes, ayant fait plusieurs révolutions pendant la descente du piston et le déroulement de la chaîne, devaient tourner librement pendant que ce piston remonterait ; un poids servait alors à faire tourner la roue qui tirait sur la chaîne et l'enroulait de nouveau. Le piston devait avoir 6 pieds de course et battre 15 coups à la minute, avec une force de 11,000 livres.

Un peu plus tard (1760), un pasteur suisse nommé J.-A. Genevois fit paraître à Londres un mémoire relatif au perfectionnement de la navigation[1]. Le système qu'il proposait consistait à bander des ressorts par le moyen de la vapeur ou d'une autre force, pour employer ensuite à la propulsion du navire la puissance qu'ils développeraient en reprenant leur forme première.

C'est à cette époque que furent faites aux États-Unis les

1. *Some New Enquiries tending to the improvement of navigation.* Londres, 1760.

premières tentatives pour résoudre ce problème, que l'on commençait à considérer comme l'un des plus importants dont les mécaniciens et les ingénieurs pussent chercher la solution.

William Henry était un habitant notable de Lancaster, alors petit village de Pensylvanie, et passait pour un mécanicien habile et heureux[1]. Il vivait encore au commencement du siècle actuel.

M. Henry fut le premier qui fit des tapis « chiffon » et il inventa la tarière à vis. Sa famille était originaire d'Écosse et du nord de l'Irlande. Son père, John Henry, et ses deux frères aînés, Robert et James, étaient venus aux États-Unis vers 1720. Robert finit par s'établir en Virginie, et on dit que Patrick Henry, l'orateur patriote, était aussi de sa famille. Ses autres parents restèrent dans le comté de Chester en Pensylvanie, où William naquit en 1729. Il apprit le métier d'armurier, et, chassé de chez lui pendant la guerre des Indes (1755 à 1760), il vint se fixer à Lancaster.

En 1760, il se rendit pour affaires en Angleterre, où son attention fut attirée par l'invention de James Watt, alors toute nouvelle et dont on s'entretenait partout. Il comprit la possibilité de l'appliquer à la propulsion des bâtiments et des voitures, et commença, dès son retour, la construction d'une machine à vapeur, qu'il acheva en 1763.

Il l'installa dans un bateau muni de roues à palettes et l'essaya sur la Conestoga près de Lancaster; mais, par suite de quelque accident, la petite embarcation coula à fond[2], et fut perdue. Sans se décourager de cet insuccès, il fit un second modèle auquel il apporta quelques perfectionnements. Dans les archives de la Société de physique de Pensylvanie, il existe, ou du moins il existait, un dessin, présenté par Henry en 1782, de l'un de ses bateaux à vapeur. Le voyageur allemand Schöpff visita les États-Unis en 1783, et chez M. Henry, à Lancaster, on lui montra « une machine

1. *Lancaster Daily Express*, du 10 décembre 1872. Ce compte rendu a été composé par l'auteur d'après plusieurs manuscrits et lettres en sa possession.

2. Bowen's *Sketches*, p. 56.

de M. Henry, destinée à la propulsion des bateaux, etc.; mais, disait l'inventeur, je ne sais si une telle machine serait favorablement accueillie du public, parce que chacun considère comme impossible de la faire marcher contre vent et marée ». Un bateau de cette espèce devait-il jamais être mis en service et naviguer sur l'Ohio et le Mississipi? A cet égard l'inventeur n'avait pas le moindre doute; « mais le temps n'est pas encore venu où cette invention sera appliquée ou appréciée ».

John Fitch, dont nous rapporterons tout à l'heure les expériences, connaissait M. Henry et lui faisait de fréquentes visites. C'est probablement là qu'il comprit pour la première fois toute l'importance de cette application de la vapeur. Vers 1777, alors que Henry s'occupait de la fabrication des instruments de physique et de mathématiques et de la tarière à vis, dont il avait le monopole, Robert Fulton, qui n'avait que douze ans à cette époque, vint le voir pour étudier les peintures de Benjamin West, qui longtemps avait été l'ami et le protégé de Henry. Il est donc aussi très possible qu'il ait conçu chez lui la première idée des études qui l'amenèrent à abandonner l'art auquel il s'était d'abord consacré, et firent du jeune peintre de portraits un mécanicien et un inventeur heureux. Les relations de West et de Henry n'avaient pas eu le même résultat. Le premier fut amené par son ami et patron à essayer de la peinture historique, et probablement il doit une grande partie de sa réputation au bienveillant et intelligent mécanicien[1]. Dans ses *Mémoires de sir Benjamin West* (Londres, 1816), Galt écrivait : « Il conserva toujours la plus affectueuse reconnaissance pour son vieil ami William Henry de Lancaster; c'est lui qui le premier le poussa à essayer de la peinture historique. »

Lorsque, après l'invention de Watt, la machine à vapeur eut pris une forme commode pour faire mouvoir l'appareil propulseur d'un navire à aubes ou à hélice, les études

1. Quelques-uns des portraits de West, y compris ceux de M. Henry, étaient récemment en la possession de M. John Jordan de Philadelphie.

nécessaires pour l'adapter à cet usage reçurent une impulsion nouvelle. En France, le marquis de Jouffroy fut l'un des premiers à comprendre que les perfectionnements de Watt, en rendant la machine moins volumineuse, plus puissante et en même temps plus régulière et plus sûre dans son action, permettaient enfin de l'appliquer facilement à la propulsion des bâtiments. Les frères Périer avaient fait venir de Soho une machine de Watt; le marquis l'étudia attentivement[1] et jugea qu'on pouvait facilement l'adapter aux roues à aubes d'un navire à vapeur. Le comte d'Auxiron et le chevalier Charles Mounin de Follenay, amis et compagnons de Jouffroy, s'intéressèrent également à cette question, et on assure que tous les trois la discutèrent souvent ensemble, et se réunirent pour chercher les moyens d'appliquer le nouveau moteur.

En 1770, d'Auxiron se décida à essayer de réaliser le système qu'il avait conçu. Il quitta l'armée, prépara ses plans et ses dessins et les présenta, en 1771 ou 1772, à M. Bertin, alors premier ministre. Celui-ci en fut très frappé et, le 22 mai 1772, le roi accorda à d'Auxiron, pour quinze années, le monopole de la navigation à vapeur sur les rivières, sous la réserve que l'efficacité du système serait démontrée et qu'elle serait admise par l'Académie.

Le jour précédent, une Société avait été constituée, qui fit l'avance des fonds nécessaires. Elle se composait de d'Auxiron, de Jouffroy, du comte de Dijon, du marquis d'Yonne et de Follenay. Le premier bateau fut commencé en décembre 1772. Il était à peu près terminé, lorsqu'en septembre 1774 il s'y déclara une voie d'eau et, une nuit, il sombra le long du quai.

Après une discussion assez vive, dans laquelle d'Auxiron fut grossièrement, et probablement à tort, accusé de mauvaise foi, la Compagnie refusa d'avancer l'argent nécessaire pour renflouer et terminer le bâtiment. Elle y fut néanmoins contrainte par les tribunaux; mais, dans l'intervalle, d'Auxiron mourut d'apoplexie; l'affaire en resta là et la

1. Figuier.

Compagnie fut dissoute. Les frais de cette expérience avaient dépassé 15,000 francs.

Les héritiers de d'Auxiron remirent à Jouffroy les papiers de l'inventeur décédé, et le roi lui transféra le monopole qu'il avait accordé à celui-ci. Follenay conserva tous ses intérêts dans l'affaire et les deux amis trouvèrent bientôt un adhérent et un protecteur puissant dans le marquis Ducrest, bien connu comme militaire, courtisan et membre de l'Académie, qui prit une part active à leurs recherches. M. Jacques Périer, mécanicien distingué, fut consulté et prépara des plans, qui furent adoptés en remplacement de ceux de Jouffroy. Il construisit un bateau, qui fut essayé en 1774, sur la Seine. L'expérience échoua. Le petit bâtiment put à peine remonter le courant peu rapide du fleuve; à la suite de cet échec, Périer renonça immédiatement à l'entreprise.

Sans se laisser décourager, Jouffroy retourna dans son pays natal, à Baume-les-Dames, sur le Doubs. Il y continua ses expériences, faisant exécuter de son mieux ses machines avec les instruments grossiers et les ressources insuffisantes d'un forgeron de village. Son appareil propulseur se composait d'une machine de Watt et d'une chaîne portant des palettes ou roue « palmipède ». Le bateau, qui avait environ 14 pieds de long et 6 de large, fut essayé en juin 1776. Le système de palettes palmipèdes ne donna pas de bons résultats; Jouffroy y renonça et recommença ses recherches en employant une autre disposition. Il monta sur l'arbre de la roue à aubes une roue à rochet, et il munit la tige du piston de sa machine, qu'il avait disposée horizontalement dans le bateau, de deux crémaillères parallèles dont les dents à rochet, disposées en sens inverse, agissaient successivement sur la roue placée entre elles et lui communiquaient ainsi un mouvement de rotation continu. La nouvelle machine fut construite à Lyon en 1780 par MM. Frère-Jean. Le bateau avait cette fois 150 pieds de long et 16 de large [1];

1. 130 et 14, d'après l'acte de notoriété dressé par devant notaires par les soins de l'Académie de Lyon, le 19 août 1783. *(N. du tr.)*

le diamètre des roues était de 14 pieds, leurs aubes avaient 6 pieds de long et plongeaient d'environ 2 pieds dans l'eau. Le bateau lui-même calait 3 pieds et son poids total était d'à peu près 150 tonnes.

Dans un essai public fait à Lyon, le 15 juillet 1783, le petit steamer réussit assez bien pour justifier la constatation du fait par un procès-verbal et un acte de notoriété. Mais, sous le prétexte que l'expérience n'avait pas eu lieu dans la capitale, l'Académie des sciences ajourna sa décision et le gouvernement en profita pour refuser d'accorder à Jouffroy le monopole qu'il demandait. Sans ressources et découragé, celui-ci abandonna tout espoir de voir ses projets aboutir et rentra dans l'armée. C'est ainsi que la France perdit un honneur qu'elle tenait presque dans sa main, comme au temps de Papin elle avait déjà perdu celui de présider à la naissance de la machine à vapeur.

Vers 1785, John Fitch et James Rumsey s'occupaient d'expériences ayant pour objet l'application de la vapeur à la navigation.

Les essais de Rumsey remontaient à 1774, et, en 1786, il parvint à faire marcher un bateau qui, en présence du général Washington, remonta le Potomac à Shepherdstown (Virginie occidentale) avec une vitesse de 4 milles à l'heure. Sa méthode de propulsion a souvent été réinventée depuis et l'adoption en a été proposée avec la persistance et l'enthousiasme qui caractérisent les inventeurs.

Rumsey employait sa machine à manœuvrer une grande pompe qui refoulait un jet d'eau vers l'arrière et faisait ainsi marcher le bateau en avant, comme l'avait autrefois proposé Bernoulli. Ce même procédé a été récemment encore essayé par l'Amirauté anglaise, dans une chaloupe canonnière de moyenne dimension, en employant une pompe centrifuge pour produire le courant d'eau propulseur, et avec quelques autres modifications qui constituent des perfectionnements incontestables sur le grossier dispositif de Rumsey, mais qui n'ont, pas plus que le sien, réussi à faire adopter le système de « propulsion par jet ou hydraulique », comme on l'appelle maintenant.

En 1787, il obtint de l'État de Virginie une patente pour la navigation à vapeur. Il écrivit un traité *Sur l'application de la vapeur,* qui fut imprimé à Philadelphie; une société Rumsey fut organisée dans cette ville pour l'encouragement des essais de navigation à vapeur.

Rumsey mourut peu de temps après, le 23 décembre 1793, à l'âge de cinquante ans, pendant qu'il exposait quelques-uns de ses projets devant une société savante de Londres. Un bateau, alors en construction d'après ses plans, fut ensuite essayé sur la Tamise en 1793, et marcha à la vitesse de 4 milles à l'heure. L'État de Kentucky, en 1839, fit présent à son fils d'une médaille d'or, en commémoration des services qu'avait rendus son père « en dotant le monde du bienfait du bateau à vapeur ».

John Fitch était un mécanicien du Connecticut, malheureux et excentrique, mais très ingénieux. Après avoir erré çà et là, jusqu'à l'âge de quarante ans, il se fixa enfin sur les rives de la Delaware, où il construisit son premier bateau à vapeur.

En avril 1785, comme il le raconte lui-même, se trouvant à Neshamony, comté de Bucks en Pensylvanie, il conçut tout à coup l'idée qu'une voiture pouvait être mise en mouvement par la vapeur. Puis, après avoir examiné la question pendant quelques jours, il se trouva conduit à porter son attention sur l'emploi de la vapeur pour la propulsion des navires et, depuis ce moment jusqu'à sa mort, il ne cessa d'être un chaud partisan des bateaux à vapeur. « A cette époque, dit Fitch, je ne savais pas qu'il existât une machine à vapeur sur la terre; » et il fut quelque peu désappointé, quand son ami, le révérend M. Irwin de Neshamony, lui en montra un dessin dans la *Physique de Martin.*

Immédiatement Fitch construisit son premier modèle, qu'il essaya bientôt après sur un petit cours d'eau près de Davisville. La machine était en bronze et le bateau était mû par des roues à palettes. Un grossier modèle de son steamboat fut présenté au docteur John Ewing, prévôt de l'université de Pensylvanie, qui, le 20 août 1785, adressa

Fitch à un ancien membre du Congrès, William C. Houston, avec une lettre élogieuse, dans laquelle il le prie de venir en aide à l'inventeur auprès du gouvernement central. Ce dernier renvoya Fitch, avec une lettre de recommandation, à un député du New-Jersey, M. Lambert Cadwalader. Muni de cette lettre et d'autres encore, Fitch se rendit à New-York où le Congrès était alors réuni, et fit sa demande officielle. Il ne réussit pas et échoua de même dans une tentative qu'il fit auprès du ministre d'Espagne; celui-ci ayant exigé que tous les bénéfices fussent attribués, avec le monopole de l'invention, à son souverain, Fitch refusa de continuer les négociations, déterminé, s'il réussissait, à faire profiter ses compatriotes de son invention.

En septembre 1785, il présenta à la Société de physique américaine, à Philadelphie, un modèle dans lequel il avait remplacé les roues à aubes par une chaîne sans fin munie de palettes. Ce modèle, représenté dans la pl. VI, fig. 1, était accompagné de dessins et d'une exposition de son système.

En mars 1786, l'État de New-Jersey accorda à Fitch une patente, lui conférant pour quatorze ans le monopole exclusif de la navigation à vapeur sur tous les cours d'eau de l'État. Un mois plus tard, il était à Philadelphie, sollicitant une patente analogue pour l'État de Pensylvanie. Il ne réussit pas immédiatement, mais en quelques jours il eut formé une compagnie, réuni un capital de 300 dollars, et se mit en devoir de trouver un emplacement pour construire sa machine. Un horloger hollandais, Henry Voight, bon mécanicien et homme très ingénieux, prit un intérêt dans la société et, de concert avec lui, Fitch se mit à l'œuvre plein d'enthousiasme. Après avoir exécuté un petit modèle, dont le cylindre n'avait que 1 pouce de diamètre, ils construisirent un bateau et une machine où le diamètre était de 3 pouces. Ils essayèrent sans succès la chaîne sans fin et d'autres méthodes de propulsion et ne réussirent qu'en employant des rames manœuvrées par la machine. En août 1786, la Compagnie décida d'autoriser la construction d'un bâtiment plus important; mais on ne put trouver tout de suite l'argent nécessaire. Pendant ce temps, Fitch continuait ses

démarches pour obtenir un brevet de l'État ; il y parvint enfin le 28 mars 1787. Il avait obtenu la même concession de l'État de Delaware, en février de la même année, et de l'État de New-York, le 19 mars.

Les souscriptions affluèrent alors plus abondamment, et la construction du bateau continua sans interruption jusqu'en mai 1787 ; mais l'essai qu'on fit à cette époque révéla de nombreux défauts dans la machine. Les fonds des cylindres étaient en bois et fuyaient considérablement ; le piston fuyait aussi ; le condenseur était imparfait, les soupapes ne fermaient pas hermétiquement. Tous ces défauts furent corrigés, et un condenseur inventé par Voight, — le « condenseur tubulaire », — fut mis à la place du condenseur défectueux employé d'abord.

Enfin le steamboat se trouva prêt à fonctionner et les essais prouvèrent qu'il pouvait faire 3 ou 4 milles à l'heure. Mais on s'aperçut que la chaudière était trop petite pour fournir d'une manière continue la vapeur nécessaire à une marche rapide. Après quelques retards et des tourments sans nombre pour l'enthousiaste inventeur, qui craignait d'échouer au moment même où il croyait tenir le succès, les changements nécessaires furent enfin exécutés ; et, le 22 août 1787, une épreuve solennelle eut lieu à Philadelphie, en présence des membres de la Convention, réunis dans cette ville pour discuter la Constitution fédérale. Un grand nombre de ces illustres spectateurs donnèrent à Fitch des lettres certifiant le succès de son invention. Il se rendit alors en Virginie, où il parvint à obtenir une patente le 7 novembre 1787 ; après quoi il retourna en solliciter une du gouvernement central.

Il s'engagea alors une vive polémique entre Fitch et Rumsey ; le premier revendiquait l'invention du bateau à vapeur et prétendait que son concurrent n'avait fait que ressusciter une méthode déjà proposée par Bernoulli, Franklin, Henry, Paine et d'autres. Fitch ajoutait encore que le *steamboat* de Rumsey n'avait été construit qu'en 1786.

La chaudière adoptée dans le bateau de Fitch de 1787

était une « chaudière tubulaire », qu'il avait décrite dans une communication faite à la Société de physique en septembre 1785. Elle consistait en un tube plein d'eau d'un petit diamètre (pl. VI, fig. 2), serpentant d'avant en arrière dans le fourneau. A une de ses extrémités arrivait l'eau d'alimentation, à l'autre se faisait la prise de vapeur. Le condenseur de Voight présentait une disposition semblable. Rumsey prétendit que cette chaudière était copiée sur ses dessins, et Fitch cita des témoins pour prouver que Rumsey n'avait construit qu'après lui une chaudière de ce genre.

La machine du premier bateau de Fitch avait un cylindre de 12 pouces de diamètre. Il en construisit, en 1788, en même temps qu'un nouveau bateau, une seconde dont les cylindres avaient un diamètre de 18 pouces. La première embarcation avait 45 pieds de long et 12 de large; la seconde était longue de 60 pieds, mais large de 8 seulement. L'une (pl. VI, fig. 3) avait sur ses flancs des palettes animées d'un mouvement semblable à celui que les Indiens donnent à leurs pagaies pour faire avancer leurs canots; dans la seconde (pl. VI, fig. 4), les palettes se mouvaient de même, mais se trouvaient à l'arrière. Le bateau fut définitivement terminé en juillet 1788 et fit un voyage à Burlington, à 20 milles de Philadelphie. A la fin de la traversée, la chaudière se fendit, et l'on revint à Philadelphie en se laissant porter par la marée. Plus tard, ce même bateau fit un certain nombre d'excursions sur la Delaware, en développant une vitesse de 3 ou 4 milles à l'heure.

En avril 1790, un autre bateau de Fitch parvint à faire 7 milles à l'heure. A propos de ce bateau, l'inventeur écrivait : « Le 16 avril nous terminions nos travaux, et nous procédions à un nouvel essai; malgré un vent très frais de l'est, nous régnions en seigneurs, comme de grands-amiraux, sur la Delaware; pas une embarcation ne pouvait lutter de vitesse avec nous. » En juin de cette même année, ce bateau fut mis au service des voyageurs, sur une ligne de Philadelphie à Burlington, Bristol, Bordentown et Trenton, route dont il s'écartait de temps à autre pour faire des excursions à Wilmington et Chester. Pendant cette période, le bâtiment par-

courut peut-être 2,000 ou 3,000 milles[1] sans aucun accident sérieux. Pendant l'hiver de 1790-1791, Fitch commença un autre bateau à vapeur, *la Persévérance*, et consacra beaucoup de temps à faire valoir ses droits pour l'obtention d'une patente aux États-Unis, patente qui lui fut enfin accordée le 26 août 1791, après une lutte longue et animée contre d'autres concurrents. Néanmoins son bateau ne fut jamais terminé, et le malheureux inventeur perdit tout espoir de succès. Il se rendit en France en 1793, espérant obtenir le privilège d'y construire des bâtiments à vapeur ; mais il fut encore une fois déçu et, l'année suivante, il revint en Amérique, et fut même réduit à s'engager comme matelot pour faire la traversée.

En 1796, Fitch était de nouveau à New-York, exécutant des expériences avec un petit bateau à vapeur *à hélice*, sur l'étang qui occupait alors la partie de la ville où se trouve maintenant la prison des Tombes. Ce petit bateau était une yole munie d'une *vis* ou hélice semblable à celle adoptée plus tard par Woodcroft, et mue par une machine grossière (pl. VII, fig. 1).

Vers la même époque, se trouvant à Philadelphie, Fitch rencontra Olivier Evans; il discuta avec lui l'avenir probable de la navigation à vapeur, et proposa de former une Compagnie dans l'Ouest, pour introduire les bateaux à vapeur sur les grands fleuves de cette partie du pays. Il se fixa enfin dans le Kentucky sur sa concession et s'y amusa avec un modèle de bateau à vapeur, qu'il mit à l'eau sur une petite rivière près de Bardstown. C'est là qu'il mourut en juillet 1798 ; et son corps repose encore dans le cimetière du village, sans autre signe qu'une pierre grossière pour marquer la place.

Fitch et Rumsey s'efforcèrent l'un et l'autre de faire adopter leurs systèmes en Angleterre ; et Fitch, lorsqu'il insistait sur l'importance et les avantages du sien, assurait avec confiance que bientôt des navires à vapeur franchiraient l'Océan, et qu'ils seraient aussi les seuls à naviguer

1. *Life of John Fitch*, Westcott.

sur le Mississipi. Il répétait souvent cette phrase qui semble aujourd'hui une prophétie : « Le jour viendra où quelque homme plus puissant retirera de mon invention honneur et richesses. Mais personne ne veut croire le pauvre John Fitch capable de faire quelque chose de digne d'attention. »

En Angleterre, pendant la même période, l'intérêt n'avait cessé de se porter sur les essais de bateaux à vapeur. Patrick Miller, de Dalswinton, avait commencé, en 1786-1787, des expériences avec des bateaux à double ou triple coque, mus par des roues à aubes placées entre les différentes parties de ces navires accouplés. James Taylor, le jeune précepteur des fils de M. Miller, proposa, en 1787, de substituer la vapeur au travail des bras employé jusqu'alors pour la propulsion. La même année, M. Miller fit imprimer une description de son plan d'appareil propulseur; dans ce travail, il disait « avoir des raisons de croire que la machine à vapeur peut être adaptée aux roues ».

Dans l'hiver de 1787-1788, William Symmington, qui avait imaginé une nouvelle forme de machine à vapeur et en avait exécuté un modèle qui fonctionnait parfaitement, fut employé par M. Miller à l'établissement d'une machine pour un nouveau bateau. Celui-ci fut construit; la petite machine, munie de deux cylindres qui n'avaient que 4 pouces de diamètre, fut placée à bord et un essai fut fait le 14 octobre 1788. L'embarcation (pl. VII, fig. 2) avait 25 pieds de long, 7 de large, et parcourait 5 milles à l'heure.

En 1789, un grand bateau fut construit, pourvu d'une machine dont le cylindre avait 18 pouces de diamètre et, au mois de novembre, il était prêt à subir les épreuves. Au premier essai, on constata que les roues à aubes n'avaient pas une solidité suffisante : elles se brisèrent. On les remplaça par d'autres plus fortes et, en décembre, le bateau, mis à l'essai, fit 7 milles à l'heure.

Miller, comme beaucoup d'autres inventeurs, semble avoir cessé de s'intéresser à l'affaire dès que le succès parut assuré; il l'abandonna pour reprendre d'autres études encore incomplètes. Plus de vingt-cinq ans après, le gouvernement anglais

accordait à Taylor une pension annuelle de 50 livres et, en 1837, chacune de ses quatre filles fut gratifiée d'une pension semblable. M. Miller ne reçut aucune récompense quoiqu'il eût dépensé, assure-t-on, plus de 30,000 livres sterling. La machine de Symmington fut condamnée par Miller comme « la plus impropre de toutes les machines à vapeur pour faire mouvoir un bâtiment ». Aucune nouvelle tentative ne fut faite en Angleterre jusqu'aux premières années du siècle suivant.

Aux États-Unis, à côté de Fitch, de nombreux ingénieurs s'étaient mis à l'œuvre. Mentionnons Samuel Morey, Nathan Read et Nicolas Roosevelt. On avait constaté que les ouvriers américains possédaient l'habileté de main nécessaire. La première machine à vapeur d'expérience, construite en Amérique le fut, dit-on, en 1773, par Christopher Colles, conférencier à la Société de physique américaine de Philadelphie. Le premier cylindre à vapeur, de dimensions un peu considérables, est attribué[1] à Sharpe & Curtenius de New-York.

Samuel Morey était fils d'un des premiers colons d'Oxford (New-Hampshire). Il était amateur passionné de science et de mécanique et devint quelque peu inventeur. Il commença à faire des expériences sur les bateaux à vapeur dès 1790, peut-être plus tôt, en construisant une petite embarcation, à laquelle il adapta des roues à aubes, mues par une machine à vapeur de son invention, qu'il avait fabriquée lui-même[2]. Un dimanche matin, pendant l'été de 1790, il fit, en compagnie d'un ami, un voyage d'essai d'Oxford à Fairlee (Vermont), en remontant le Connecticut sur une distance de plusieurs milles, et revint sans accident. Il se rendit alors à New-York[3] et passa tous ses étés, jusqu'en 1793, à expérimenter son bateau et à perfectionner sa machine. En 1793, il fit un voyage à Hartford et revint à New-York l'été suivant. Son bateau avait les roues

1. *Rivington's Gazette*, du 16 février 1775.
2. *Providence-Journal*, du 7 mai 1874.
3. Westcott.



Fig. 1. — John Fitch, 1796.



Fig. 2. — Miller, Taylor et Symmington, 1788.

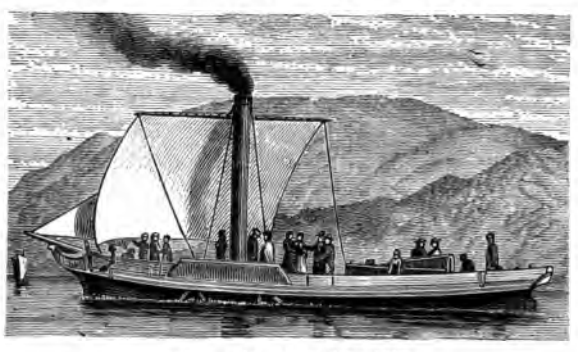


Fig 3. — La « Comète », 1812.

à l'arrière et pouvait, dit-on, faire 5 milles à l'heure. Il alla ensuite à Bordentown (New-Jersey), où il construisit un bateau plus grand, lequel avait les roues de côté et fonctionnait d'une manière satisfaisante. Enfin, ses ressources étant épuisées, il abandonna son projet, après avoir fait, en 1797, un voyage à Philadelphie. Fulton, Livingston et Stevens virent Morey à New-York, examinèrent son bateau et firent une excursion à Greenwich avec lui[1]. On assure que Livingston[2] offrit à Morey de lui venir en aide s'il parvenait à obtenir une vitesse de 8 milles à l'heure.

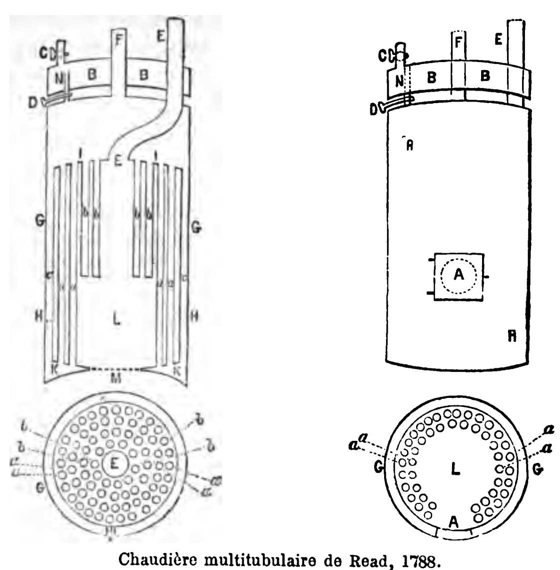
Les expériences de Morey semblent toutefois avoir été faites sans aucun bruit, et l'on ne sait presque rien sur ce sujet. L'auteur n'a pu se procurer aucun renseignement sur les machines dont il se servait, et rien de précis n'est connu sur les dimensions soit des bateaux, soit des organes du mécanisme. A l'inverse de Fitch et de Rumsey, Morey ne chercha jamais ni la publicité pour ses projets, ni la notoriété pour lui-même.

Nathan Read, que nous avons déjà cité, naquit à Warren (Massachusets) en 1759. Il avait pris ses grades au collège Harvard; il fut étudiant en médecine et plus tard devint fabricant de câbles-chaînes et autres objets en fer pour la marine. Il inventa et fit breveter, en 1798, une machine à faire les clous. Il fut une fois (de 1800 à 1803) membre du Congrès, plus tard juge à la cour des plaids communs, et enfin premier juge dans le comté en Hancock (Maine), quand il eut transporté sa résidence dans cet État, en 1807. Il mourut à Belfast (Maine) en 1849, à l'âge de quatre-vingt-dix ans.

En 1788, il commença à s'occuper du problème de la navigation à vapeur et eut connaissance des travaux de Fitch. Il essaya d'abord d'organiser une chaudière qui fût solide, légère, peu volumineuse, et présentât une sécurité complète. Son premier système fut celui de la « chaudière-fourneau portative », comme il l'appelait; elle fut brevetée le

1. Rev. Cyrus Mann dans le *Boston Recorder*, 1858.
2. Westcott.

26 août 1791. Elle consistait, ainsi qu'on le voit par les figures 73 et 74, qui sont des réductions des dessins de son brevet, en une enveloppe de forme cylindrique semblable à celle des chaudières tubulaires verticales, si répandues aujourd'hui. A est la porte du foyer, B un réservoir réchauffeur



Chaudière multitubulaire de Read, 1788.

Fig. 73. — Coupes transversale et horizontale.

Fig. 74. — Élévation et plan.

pour l'eau d'alimentation, D le tuyau qui conduit cette eau dans la chaudière [1], E le tuyau de dégagement de la fumée, F celui qui mène la vapeur à la machine. G est « l'enveloppe » de la chaudière et H la boîte à feu. Du ciel du foyer II partent une série de tubes à eau *bb*, fermés à leur extrémité inférieure, qui descendent dans la flamme; une autre série de tubes *aa* fait communiquer l'eau qui couvre le ciel du foyer avec celle qui remplit le double fond KK autour de la grille. L est le foyer et M le jour mé-

1. Le principe de cette disposition est devenu dans ces derniers temps d'une application générale et a fait l'objet de plusieurs brevets.

nagé pour le tirage entre la chaudière et le cendrier ; c'est là qu'est placée la grille.

Cette chaudière était faite pour les voitures aussi bien que pour les bateaux à vapeur. Les premiers dessins furent dressés en 1788 ou 1789, ainsi que ceux d'un type particulier de machine à vapeur, qui ressemblait aussi beaucoup à celle que Trevithick exécuta plus tard en Angleterre[1]. En 1789, Nathan Read construisit un bateau auquel il adapta des roues à aubes, mues par une manivelle qu'on faisait tourner à la main ; il s'assura par des essais que le système fonctionnerait d'une manière satisfaisante.

Il fit alors une demande de brevet et passa la plus grande partie de l'hiver de 1789-1790 à New-York, où le Congrès siégeait, pour essayer de l'obtenir. En janvier 1791, il retira ses demandes, afin d'y ajouter les descriptions de nouveaux appareils, et les représenta quelques mois plus tard. Les brevets lui furent enfin accordés à la date du 26 août 1791. C'est aussi à cette même date que John Fitch, James Rumsey et John Stevens reçurent des brevets pour diverses méthodes d'appliquer la vapeur à la propulsion des vaisseaux.

On peut croire que Read ne parvint jamais à faire réussir son système, même sur un modèle d'expérience. Il n'en mérite pas moins une mention, pour avoir compris de bonne heure toute l'importance de la question et pour l'ingéniosité de ses idées. Comme inventeur de la chaudière multitubulaire avec boîte à feu, il a conquis également des droits à la célébrité. Cette chaudière est maintenant d'un usage général et constitue une forme type.

En 1792, Elijah Ormsbee, simple ouvrier mécanicien du Rhode Island, aidé pécuniairement par David Wilkinson, construisit un petit bateau à vapeur à Winsor's Cove, dans la baie de Narragansett, et fit sur la Seekonk un voyage d'essai qui réussit parfaitement. Ormsbee employait une « machine atmosphérique » et des palettes « palmipèdes ». Son bateau atteignait une vitesse de 3 à 4 milles à l'heure.

1. *Nathan Read and the Steam-Engine.*

En Angleterre, lord Dundas et William Symmington, le premier agissant comme bailleur de fonds, et le second comme mécanicien, suivis de près par Henry Bell, furent les premiers qui parvinrent à appliquer la machine à vapeur à la propulsion des vaisseaux avec assez de succès pour que, depuis, aucun temps d'arrêt ne se soit produit dans le développement continu du nouveau système de transport par eau.

Thomas lord Dundas, de Kerse, avait pris un grand intérêt aux expériences de Miller, et avait conçu l'espoir de pouvoir employer le nouveau moteur sur le canal du Forth à la Clyde, dans lequel il avait engagé des capitaux considérables. Malgré l'insuccès des premières tentatives, il n'oublia pas l'affaire ; et rencontrant plus tard Symmington, qui avait travaillé comme ingénieur pour le compte de Miller, il l'engagea à continuer ses essais, en fournissant l'argent nécessaire, environ 7,000 livres sterling. Il y avait alors dix ans que Miller avait renoncé à ses recherches.

Symminton se mit à l'œuvre en 1801. Le premier bateau construit pour lord Dundas, bateau qu'on a prétendu avoir été le « premier steamboat pratique », fut prêt à être essayé au commencement de 1802. Il avait reçu le nom de « Charlotte Dundas » en l'honneur de la fille de lord Dundas, qui devint plus tard lady Milton.

Cette embarcation (fig. 75) avait pour moteur une machine de Watt à double effet, qui faisait tourner une manivelle fixée à l'arbre des roues à aubes. La coupe ci-dessous fait voir la disposition du mécanisme : A est le cylindre à vapeur qui, par le moyen de la bielle BC, fait marcher la roue placée à l'arrière EE; F est la chaudière et G la cheminée. On voit, au-dessous du cylindre, une pompe à air et un condenseur H.

En mars 1802, le bateau fut amené à l'écluse n° 20 du canal de la Clyde au Forth, et deux bateaux, chargés de 70 tonnes chacun, furent mis à la remorque. Lord Dundas, William Symmington et une société d'invités prirent place à bord et le bateau descendit jusqu'à Port-Glasgow, parcourant en

6 heures, malgré un vent debout très violent, cette distance d'environ 20 milles.

Les propriétaires du canal furent alors pressés d'adopter le nouveau système de touage; mais ils s'y refusèrent, craignant les dégradations qui pouvaient en résulter pour les berges. Lord Dundas soumit la question au duc de Bridgewater qui commanda à Symmington, pour son canal, huit bateaux pareils à la *Charlotte Dundas*. La mort du duc

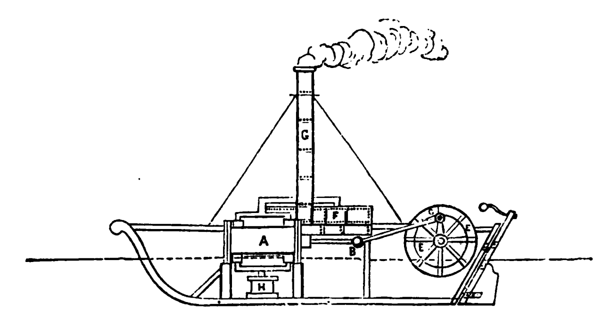


Fig. 75. — La *Charlotte Dundas*. 1801.

vint toutefois empêcher l'exécution de ce contrat, et Symmington désespéré renonça encore une fois à ses projets. Un quart de siècle plus tard, il reçut du gouvernement anglais 100 livres sterling, et un peu après 50 autres encore, en reconnaissance de ses services. La *Charlotte Dundas* fut démontée et l'on n'en entendit plus parler.

Mais, parmi ceux qui avaient vu ce bâtiment et apprécié l'importance des résultats obtenus par Symmington, se trouvait Henry Bell, qui, dix ans plus tard, construisit la *Comète* (pl. VII, fig. 3), le premier bateau pour voyageurs qui ait existé en Europe. Commencé en 1811 et terminé le 18 janvier 1812, il jaugeait 30 tonneaux, avait 40 pieds de long et 10 pieds et demi de largeur de bau. Il était muni, de chaque côté, de *deux* roues à aubes mues par des machines de 3 chevaux.

Bell s'était, dit-on, montré dès 1786 enthousiaste fermement convaincu des avantages que devait procurer cette

application de la vapeur. En 1800, et de nouveau en 1803, il s'adressa à l'Amirauté britannique pour obtenir les moyens de lui assurer ces avantages, en déterminant par expérience la forme et les proportions les plus convenables pour la machine et le bâtiment. Mais il ne put convaincre ces hauts personnages de «la possibilité pratique et de la grande utilité d'appliquer la vapeur à la propulsion des vaisseaux contre vents et marées, et en général contre tout obstacle qu'on pouvait rencontrer sur les mers ou les rivières, pourvu qu'on y trouvât la profondeur d'eau suffisante». Il écrivit aussi au gouvernement des États-Unis, pour lui recommander ses projets avec la même ardeur.

Quand le bateau de Bell fut terminé, il l'annonça comme un navire destiné au transport des voyageurs, qui devait faire régulièrement le service entre Greenock, où il avait été construit, et, Glasgow situé à 24 milles de distance. Il devait partir les lundis, mercredis et vendredis de chaque semaine, et faire le voyage de retour les mardis, jeudis et samedis. Le prix de la traversée était de « 4 shillings pour la meilleure cabine et trois pour la seconde». Quelques mois s'écoulèrent avant que le bâtiment fût considéré par le public comme constituant un moyen de transport auquel on pût se fier. En résumé Bell fit au début de grandes pertes dans l'affaire, bien que son bateau fût très solide et fort bien établi.

Ce même inventeur construisit plusieurs autres bateaux en 1815, et leur réussite inaugura définitivement la navigation à vapeur dans la Grande-Bretagne. En 1814, il n'y avait que 5 steamers, tous écossais, fonctionnant régulièrement dans les eaux britanniques; en 1820, il en existait 34, dont la moitié en Angleterre, 14 en Écosse et les autres en Irlande. Vingt ans après, à la fin de la période que nous étudions spécialement dans ce chapitre, il se trouvait dans les trois royaumes environ 1325 bâtiments à vapeur, dont 1,000 anglais et 250 écossais.

Mais il nous faut revenir en Amérique pour être témoins du premier et du plus complet succès, au point de vue commercial, de l'introduction des steamboats.

MM. Stevens, Livingston, Fulton et Roosevelt y furent les pionniers les plus heureux de cette entreprise. On rapporte que le dernier construisit la *Polacca*, petit bateau à vapeur lancé sur la Passaïc en 1798. Il avait 60 pieds de long. Sa machine, de 20 pouces de diamètre de cylindre et 2 pieds de course de piston, lui fit faire 8 milles à l'heure, dans une promenade où il transporta une société d'invités, dont faisait partie le ministre d'Espagne. Livingston et John Stevens avaient déjà[1] amené Roosevelt à essayer leurs systèmes, en payant eux-mêmes les frais des expériences. Le premier adopta la méthode de Bernoulli et Rumsey, c'est-à-dire se servit d'une pompe centrifuge pour refouler un jet d'eau qui s'écoulait par l'arrière ; le dernier employa l'hélice. Livingston se rendant en France comme ministre des États-Unis, Barlow acheva les plans de la *Polacca*, et les amis de Roosevelt rapportent qu'un bateau construit par eux, de concert avec Fulton, était un *sister-ship* de ce bâtiment[2]. En 1798, Roosevelt fit breveter une machine double actionnant deux manivelles à angle droit. Mais ce ne fut qu'en 1814 qu'il reçut un brevet pour un navire à vapeur muni de roues à aubes, dans lesquelles la longueur des palettes pouvait se régler à volonté. Certains auteurs assurent que son bateau de 1798 fut exécuté de compte à demi avec Livingston et Stevens. Quelques années plus tard, Roosevelt était encore une fois à l'œuvre, associé avec Fulton, pour l'introduction de la navigation à vapeur sur les fleuves de l'Ouest[3].

En 1798, la législature de New-York vota une loi donnant à Livingston le monopole exclusif de la navigation à vapeur dans les eaux de l'État, pendant une période de vingt années, *pourvu* qu'avant un an il parvînt à construire un bateau capable de faire 4 milles à l'heure.

Livingston ne réussit pas à satisfaire à ces conditions ;

1. *Encyclopædia americana.*

2. *Sister-ship* ou vaisseau-sœur est le terme technique en usage en Angleterre pour désigner deux navires du même modèle, et en quelque sorte de la même famille. *(N. du Tr.)*

3. *A Lost Chapter in the History of the steamboat*, J.-H.-B. Latrobe, 1871.

mais en 1803 il obtint la remise en vigueur de la même loi en faveur de lui-même et de Robert Fulton, qui se trouvait alors en France, où il expérimentait la navigation à vapeur, après avoir étudié les progrès réalisés en Angleterre et pris un brevet en Amérique.

Robert Fulton naquit en 1765, à Little Britain, comté de Lancaster (Pensylvanie). Il commença ses expériences



Fig. 76. — Robert Fulton.

sur les roues à aubes en 1779, alors que, n'étant encore qu'un enfant, il se trouvait en visite chez une tante qui demeurait sur les rives de la Conestoga [1]. Dans sa jeunesse, il passait une grande partie de son temps dans les ateliers du voisinage et apprit un moment le métier d'horloger ; mais finalement il adopta la profession d'artiste et fit preuve d'une habileté réelle dans la peinture des portraits. Pendant qu'à ce moment ses goûts le portaient vers les arts, on raconte qu'il fit de fréquentes visites à William Henry, dont

1. Voir *Life of Fulton*, Reigart.

nous avons déjà parlé. Il allait voir chez lui les tableaux de Benjamin West, qui, dans sa jeunesse, avait été en quelque sorte le protégé de M. Henry; et il est probable qu'il y vit aussi les modèles de bateaux à vapeur, que M. Henry montra en 1783 ou 1784 au voyageur allemand Schöpff. Dans ses dernières années, Thomas Paine, l'auteur du *Sens commun*, demeura quelque temps avec Henry, et plus tard, en 1788, il proposa au Congrès de prendre en main la question pour le bien du pays.

Fulton se rendit en Angleterre quand il eut atteint sa majorité, et étudia la peinture avec Benjamin West. Il passa ensuite deux années dans le Devonshire, où il rencontra ce même duc de Bridgewater, qui plus tard fut si prompt à tirer parti du succès de la *Charlotte Dundas*.

Pendant son séjour en Angleterre et en France, —où il alla en 1797 et résida quelque temps,— il est possible qu'il ait vu quelque chose des tentatives que l'on commençait alors à faire pour introduire la navigation à vapeur dans ces deux pays.

Vers le même temps aussi, — peut être en 1793, —Fulton abandonna la profession de peintre et devint ingénieur civil. En 1797, il se rendit à Paris et commença des expériences sur les torpilles sous-marines et les bateaux-torpilles. En 1801, il avait assez bien réussi dans cette voie pour causer une vive inquiétude en Angleterre, qui se trouvait alors en guerre avec la France.

Dès 1793, il avait proposé des projets de bâtiments à vapeur, tant aux États-Unis qu'au gouvernement anglais; et il semble n'avoir jamais entièrement perdu de vue ce sujet[1]. Pendant qu'il était en France, il vécut avec Joël Barlow, qui, plus tard, fut connu comme poète et comme ambassadeur des États-Unis dans ce pays, mais qui alors était dans les affaires à Paris.

Comme il était sur le point de quitter la France, Fulton rencontra Robert Livingston (le chancelier Livingston, comme on l'appelle souvent), qui alors (1801) y représen-

1. Voir *Life of Fulton*, Colden.

tait les États-Unis. Ils discutèrent ensemble le projet d'appliquer la vapeur à la navigation et résolurent d'essayer de construire un steamboat sur la Seine. Au commencement du printemps de 1802, Fulton ayant accompagné Mme Barlow à Plombières, où elle avait été envoyée par son médecin, y fit des dessins et des modèles, qui furent transmis ou décrits à Livingston. L'hiver suivant, Fulton acheva l'exécution d'un modèle de bateau à roues latérales.

Le 24 janvier 1803, il remit ce modèle à MM. Molar, Bordel et Montgolfier, avec un mémoire descriptif, dans lequel il disait avoir prouvé par expérience que les roues latérales valaient mieux que le «chapelet» (palettes fixées sur une chaîne sans fin)[1]. Ces messieurs étaient alors occupés à construire, pour Fulton et Livingston, leur premier bateau dans l'île des Cygnes, sur la Seine. En faisant le plan de ce bateau, Fulton avait imaginé plusieurs méthodes différentes pour appliquer la vapeur à la propulsion, et fait quelques expériences pour mesurer la résistance des fluides. Il avait pu par conséquent calculer, plus exactement qu'aucun des inventeurs précédents, les proportions des diverses parties du bateau et de la machine.

L'auteur de ce livre a examiné une collection considérable des dessins de Fulton, parmi lesquels se trouvent des croquis, très bien exécutés, de plusieurs de ces systèmes, y compris les bateaux à chapelet, à roues latérales, à roue arrière, mus par diverses sortes de machines à vapeur, quelques-unes agissant directement et d'autres par le moyen d'un engrenage, sur l'arbre de la roue à palettes. Les fig. 77 et 78 sont empruntées à deux de ces dessins. La première représente la méthode adoptée par Fulton pour déterminer la résistance qu'opposent des solides en bois, de formes et de proportions diverses, quand on les remorque à travers l'eau. L'autre est une « Table des résistances des corps qui se meuvent dans l'eau, d'après les expériences faites en Angleterre par une société pour le perfectionnement de l'archi-

1. Un inventeur français nommé Desblancs, horloger à Trévoux, avait déjà déposé au Conservatoire un modèle muni de chapelets.

tecture navale, pendant les années 1793 à 1798 » (fig. 78). Cette dernière figure a été prise sur une copie certifiée con-

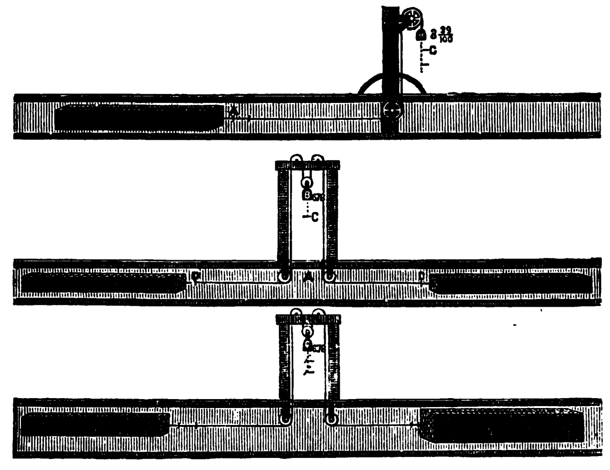
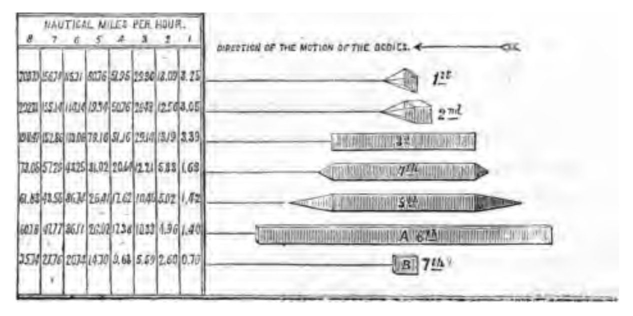


Fig. 77. — Expériences de Fulton.

forme du « Dessin original au dossier, dans l'office du greffier du district de New-York, faisant partie de la démonstra-



NAUTICAL MILES PER HOUR.							
8	7	6	5	4	3	2	1
[illegible]	156.74	115.21	80.76	51.95	29.30	18.09	3.25
[illegible]	155.14	114.14	79.34	50.76	28.48	12.56	3.05
[illegible]	152.86	113.06	79.16	51.16	29.14	13.19	3.39
73.06	57.29	44.25	31.02	20.44	12.21	5.88	1.68
61.88	48.56	36.34	26.41	17.62	10.46	5.02	1.42
60.16	47.77	36.51	26.02	17.36	10.33	4.96	1.40
35.34	27.76	20.34	14.30	9.68	5.69	2.60	0.70

Fig. 78. — Table des résistances de Fulton.

tion du brevet accordé à Robert Fulton Esqr., le 11e jour de février 1809. Daté ce 3 mars 1814 » ; et signée Theron Rudd, greffier du district de New-York. Les résistances sont données en livres par pouce carré.

Guidé par ces expériences et ces calculs, Fulton dirigea la construction de son bateau. Celui-ci fut terminé au printemps de 1803. Mais malheureusement la coque du petit bâtiment était trop faible pour supporter le poids de sa lourde machine; elle se rompit et coula au fond de la Seine. Sans se décourager, Fulton se mit de suite à réparer le mal; il fut obligé de faire reconstruire la coque. La machine avait peu souffert. En juin 1803, la reconstruction était terminée et le bateau fut mis à l'eau en juillet. La

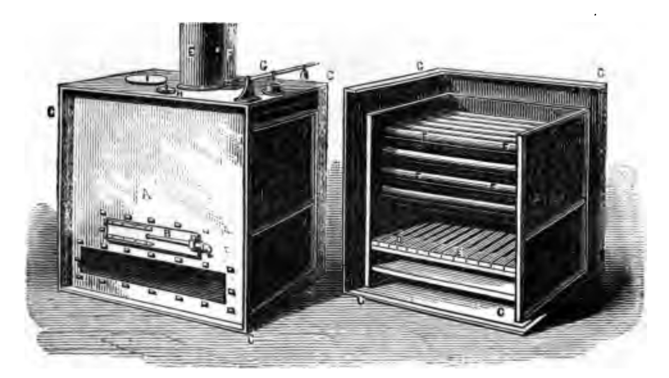


Fig. 79. — Chaudière à tubes à eau de Barlow. 1793.

coque avait 66 pieds de long et 8 pieds de large : le tirant d'eau était assez faible.

Le 9 août 1803, ce bateau largua ses amarres et remonta la Seine en présence d'un immense concours de spectateurs. Une Commission de l'Académie nationale, composée de Bougainville, Bossut, Carnot et Périer, était présente pour contempler l'expérience. Le bateau ne marcha que lentement, faisant seulement de 3 à 4 milles à l'heure contre le courant, la vitesse réelle, relativement à l'eau, étant d'environ 4 milles et demi ; mais c'était en somme un grand succès.

L'expérience avait donc réussi. Pourtant elle attira peu l'attention, quoique elle eût eu pour témoins la Commission de l'Académie, nombre de savants et de mécaniciens bien connus, et des officiers de l'état-major de Napoléon. Le bateau resta longtemps sur la Seine, près du palais. La

chaudière à tubes à eau de ce bâtiment (fig. 79) est encore au Conservatoire des arts et métiers à Paris, où elle est connue sous le nom de Chaudière de Barlow.

Celui-ci l'avait fait breveter en France dès 1793, comme chaudière pour bateaux à vapeur, en indiquant que le but de cette disposition était d'obtenir la plus grande surface de chauffe possible.

Fulton s'efforça, mais en vain, d'obtenir la protection et des secours pécuniaires du premier consul.

Livingston écrivit en Amérique, décrivit l'essai de ce bateau et les résultats obtenus, et obtint de la législature de l'État de New-York le vote d'un acte prolongeant pour vingt ans, à compter du 5 avril 1803, date de la nouvelle loi, le monopole qui lui avait été accordé en 1798, et étendant à deux années, à partir du même jour, le délai qui lui avait été fixé pour prouver la possibilité de faire marcher un bateau par la vapeur, avec une vitesse de 4 milles à l'heure. Un dernier acte enfin prolongea ce délai jusqu'en avril 1807.

En mai 1804, Fulton se rendit en Angleterre, renonçant à tout espoir de réussir en France soit avec ses steamboats, soit avec ses torpilles. Il avait déjà écrit à Boulton & Watt pour commander une machine construite d'après les plans qu'il leur fournissait. Elle devait avoir un cylindre de 2 pieds de diamètre et de 4 pieds de course de piston. La machine de *la Charlotte Dundas* était presque de la même dimension, et ce fait, ainsi que la visite de Fulton à Symmington en 1801, visite racontée par ce dernier, ont servi de base à l'assertion que Fulton n'avait fait que copier les plans des autres. La similitude générale des dimensions du bateau qu'il essaya sur la Seine, avec celles de *la Polacca* de Roosevelt, fut aussi prise comme prétexte à réclamations par les amis de celui-ci. Il semblerait toutefois que l'affirmation de Symmington n'est pas exacte, puisque Fulton était en France, occupé d'expériences sur les torpilles, précisément à l'époque (juillet 1801) [1] où on l'accuse d'avoir obtenu de l'ingénieur anglais des renseignements sur

1. *Woodcroft*, p. 64.

les dimensions et le fonctionnement de son bateau. Pourtant un chauffeur au service de Symmington a fait en justice une déclaration semblable. En résumé il est évident, d'après ce qui précède, que les divers inventeurs et constructeurs dont, à cette époque, les efforts tendaient à faire réussir les bateaux à vapeur, étaient habituellement très au courant de ce qui avait été fait par d'autres et de ce que faisaient à ce moment même leurs contemporains; et il est hors de doute que chacun d'eux tirait parti, autant qu'il le pouvait, de l'expérience acquise par ses rivaux.

Pendant son séjour en Angleterre, Fulton n'était certainement pas tellement absorbé par ses expériences sur les torpilles, dont il s'occupa de 1804 à 1806, qu'il oubliât ses plans de bateau à vapeur; il fit compléter la machine qu'il avait commandée en 1804, et, sans l'attendre, s'embarqua en octobre 1806 à Falmouth pour New-York, où il arriva le 13 décembre suivant.

Bientôt la machine arriva à son tour et Fulton se procura immédiatement un bâtiment pour l'y installer. Dans l'intervalle, Livingston était aussi revenu aux États-Unis, et les deux enthousiastes se mirent ensemble à travailler à un steamer plus considérable qu'aucun de ceux construits jusqu'alors.

Au printemps de 1807, le *Clermont* (pl. VIII, fig. 1) — c'était le nom du nouveau bâtiment — fut lancé des chantiers de Charles Brown, sur l'East River à New-York. En août, la machine fut mise à bord et en état de fonctionner. La coque de ce navire avait 133 pieds de long, 18 de large et 9 de profondeur. Il fit bientôt un voyage à Albany, parcourut cette distance de 150 milles en 32 heures de marche et revint en 30 heures. On ne fit usage des voiles ni à l'aller ni au retour.

C'était le premier voyage important qu'eût jamais fait un bateau à vapeur; et Fulton, bien que ne pouvant être mis comme inventeur sur la même ligne que James Watt, peut revendiquer le grand honneur d'avoir été le premier à faire passer la navigation à vapeur dans la pratique courante et à réaliser l'application de la vapeur à la pro-

pulsion des vaisseaux, sans renoncer avant le succès définitif.

La machine du *Clermont* (pl. VIII, fig. 2) était d'une forme assez particulière. Le piston E était réuni à l'arbre O par un balancier coudé IHP et une bielle PQ; les roues à aubes MN étaient portées par un arbre spécial, relié au premier par des engrenages OO. Les cylindres avaient 24 pouces de diamètre et la course du piston était de 4 pieds. Les roues avaient des aubes de 4 pieds de long, plongeant dans l'eau de 2 pieds. On peut voir dans la salle de conférences de l'auteur, à l'Institut de technologie Stevens, de vieux dessins, de la main même de Fulton, représentant cette machine telle qu'elle était en 1808, et aussi celle d'un steamer construit plus tard, le *Chancelier Livingstone*.

Le voyage du *Clermont* à Albany fut l'occasion de quelques incidents curieux, qui se reproduisirent partout où, dans la suite, des steamers se montrèrent pour la première fois. Le biographe de Fulton, M. Colden, raconte que les personnes qui virent passer le navire pendant la nuit en parlaient comme d'un « monstre se mouvant sur les eaux, défiant vent et marée, et vomissant de la fumée et des flammes ».

Ce premier steamboat employait comme combustible du bois sec de pin, et les flammes s'élevaient à une hauteur considérable au-dessus de la cheminée. Quand on tisonnait le foyer, une gerbe de fumée et d'étincelles s'élançait dans les airs. « Cette lumière insolite, dit Colden, fut la première chose qui frappa les équipages des autres bâtiments. Bien que le vent et la marée s'opposassent à la marche du steamer, ils le virent avec étonnement s'avancer rapidement vers eux, et quand il fut assez près pour qu'on entendît le bruit de la machine et des roues, les mariniers, s'il faut en croire les journaux du temps, se cachèrent sous les ponts pour ne pas voir ce terrible spectacle, et laissèrent leurs bateaux aller à la dérive ; tandis que d'autres, se prosternant, suppliaient le ciel de les protéger contre ce monstre horrible, qui marchait sur les flots en vomissant des flammes pour éclairer sa marche. »

Fulton avait déjà donné au *Clermont* quelques-uns des traits qui caractérisent aujourd'hui les bateaux à vapeur des fleuves d'Amérique, et il en ajouta encore d'autres dans la suite. Mais le travail le plus important et qui lui fait le plus d'honneur, à part l'introduction des bateaux à vapeur dans la pratique de tous les jours, ce fut la détermination expérimentale de la résistance opposée par l'eau à la marche des navires, et des lois qui la régissent, ainsi que le calcul méthodique des dimensions du bâtiment et de la machine, suivant le travail qu'on voulait leur demander.

Le succès du *Clermont,* dans son voyage d'essai, fut tel que bientôt après Fulton fit annoncer publiquement que le bâtiment ferait un service régulier pour les voyageurs entre Albany et New-York[1].

1. Sur un fragment de journal conservé par l'auteur, on lit ce qui suit : « Le voyageur qui s'embarque aujourd'hui sur les grands steamboats Saint-John ou Drew peut à peine s'imaginer combien ces palais flottants diffèrent des méchantes embarcations dont nos pères se contentaient il y a soixante ans. Nous pouvons toutefois nous faire une idée de la sorte de chose alors en usage, en parcourant les avis publiés pour les steamboats de l'époque et dont voici deux échantillons :

Copie d'une annonce prise dans la Gazette d'Albany, *de septembre* 1807.

« Le steamboat de la *North River* partira de Pauler's-Hook Ferry (aujourd'hui Jersey-City), le vendredi 4 septembre à neuf heures du matin, et arrivera à Albany le samedi à neuf heures du soir. On y trouve nourriture, bons lits et toutes commodités.

« Le prix pour chaque passager est fixé comme il suit :

« Jusqu'à	Newburg.	3 dollars.	— Temps,	14 heures.	
—	Poughkeepsie . .	4	—	—	17 —
—	Esopus	5	—	—	20 —
—	Hudson.	5 1/2	—	—	30 —
—	Albany	7	—	—	36 —

« Pour les places, s'adresser à William Vandervoort, n° 48, Courtlandt street, au coin de Greenwich street.

« 2 septembre 1807. »

*Extrait de l'*Evening-Post, *de New-York, du 2 octobre 1807.*

« Le steamboat nouvellement inventé par M. Fulton, très convenablement approprié pour les voyageurs et destiné à faire le service de paquebot

Pendant l'hiver suivant, le *Clermont* fut réparé et agrandi, et dans l'été de 1808 il reprit de nouveau la route d'Albany; dans l'intervalle, deux nouveaux steamboats, le *Raritan* et le *Car of Neptune* (Char de Neptune), avaient été construits par Fulton. En 1811, il construisit encore le *Paragon*. Les deux derniers de ces navires étaient, comme dimension, presque doubles du *Clermont*. Un bac à vapeur fut aussi établi en 1812, pour faire le service entre New-York et Jersey-City, et l'année suivante on en organisa deux autres pour relier la métropole avec Brooklyn. Ceux-ci étaient des « bateaux jumelés », c'est-à-dire composés de deux coques parallèles réunies par un « pont » commun. Le bac de Jersey faisait dans un 1/4 d'heure un trajet d'un mille et demi, qu'on parcourt aujourd'hui en 10 minutes. Le bac de Fulton pouvait porter à la fois 8 voitures et environ 30 chevaux, tout en ayant encore de la place pour 300 ou 400 passagers. Fulton fit aussi les plans de bateaux à vapeur destinés à naviguer sur les fleuves de l'Ouest, et en 1815 quelques-uns furent mis en service comme « packets » sur la ligne de New-York à Providence (Rhode-Island).

Cependant la guerre de 1812 avait éclaté; Fulton fit le plan d'un vaisseau de guerre à vapeur, qui fut alors considéré comme un navire extraordinairement redoutable. Ses projets furent soumis à une commission d'officiers de marine expérimentés, parmi lesquels se trouvaient les commodores Decatur et Perry, le capitaine John Paul Jones, le capitaine Evans et d'autres dont les noms sont encore bien connus et qui jouissaient d'une haute réputation. Fulton se proposait de construire un bâtiment à vapeur, capable de porter une puissante artillerie et de faire 4 milles à l'heure. Il devait être muni de fourneaux pour le tir à boulet rouge. Quelques-uns de ses canons devaient tirer au-dessous de la ligne de flottaison. Le prix était évalué à 320,000 dollars (1,600,000 fr.).

entre Albany et New-York, est parti ce matin avec 90 passagers, malgré un fort vent debout. Néanmoins on a estimé qu'il se mouvait sur l'eau avec une vitesse de 6 milles à l'heure. »

La construction fut autorisée par le Congrès en mars 1814; la quille fut mise en chantier le 20 juin suivant, et le bâtiment fut lancé le 20 octobre de la même année. (Pl. VIII, fig. 3.)

Le *Fulton the First* (Fulton Ier), comme on l'appela, passait à l'époque pour un énorme vaisseau. La coque était double, mesurait 156 pieds de long, 56 de large, 20 pieds de profondeur et jaugeait 2,475 tonneaux. En mai suivant, le navire était prêt à recevoir sa machine, et en juillet sa construction était assez avancée pour lui permettre de faire, dans un voyage d'essai à la mer, jusqu'à Sandy Hook aller et retour, 53 milles en 8 heures 20 minutes. Au mois de septembre, avec l'artillerie et tout le matériel à bord, la même route fut encore parcourue avec une vitesse de 5 1/2 milles à l'heure.

Le bâtiment ainsi terminé avait deux coques, dont chacune était de 20 pieds plus longue que le *Clermont*, et que séparait un intervalle de 15 pieds. La machine, dont le cylindre avait 48 pouces de diamètre et 5 pieds de course de piston, était alimentée de vapeur par une chaudière en cuivre de 22 pieds de long, 12 de large et 8 de haut; elle faisait tourner une roue placée entre les deux coques et dont le diamètre était de 16 pieds; cette roue portait des palettes ou aubes de 14 pieds de longueur, qui plongeaient de 4 pieds dans l'eau. La machine était placée dans l'une des coques et la chaudière dans l'autre. Les bordages avaient, à hauteur de la batterie, 4 pieds 10 pouces d'épaisseur, et le faux pont était entouré de solides bastingages à l'épreuve de la mousqueterie. L'armement se composait de 30 canons de 32 destinés à lancer des boulets rouges. Chacune des coques portait un mât très fort muni d'une grande voile latine. Toutes deux avaient un gouvernail à chacune de leurs extrémités. Le bâtiment portait aussi d'énormes pompes destinées à jeter des masses d'eau sur les ponts des navires ennemis, afin de les mettre hors de combat en noyant leurs munitions. L'avant de chaque coque devait être armé d'un canon sous-marin, pouvant tirer un projectile de 100 livres à 10 pieds au-dessous de la ligne de flottaison.

C'était la première application de la machine à vapeur à la marine de guerre, et, pour l'époque, elle était des plus remarquables. Malheureusement, Fulton ne vécut pas assez pour voir le bâtiment achevé. Il était engagé dans un procès, de concert avec Livingston, qui cherchait alors à obtenir de l'État de New-Jersey la permission d'établir une ligne de bateaux à vapeur dans les eaux de l'Hudson et de la baie de New-York ; en revenant d'assister à une séance de la législature à Trenton, en janvier 1815, il se trouva exposé dans la baie à un temps rigoureux, que sa santé n'était pas alors en état de supporter. Il tomba malade et mourut le 24 février suivant. Sa mort fut pleurée comme une calamité nationale.

D'après le rapide historique que nous venons de faire de la vie de cet homme distingué et de ses travaux, on voit que si Robert Fulton n'est pas, à proprement parler, un inventeur, il fut au moins l'un des plus capables, des plus persévérants et des plus heureux parmi ceux qui ont bien mérité de l'humanité en la mettant en possession d'inventions déjà faites. C'était un ingénieur intelligent, un industriel entreprenant, dont l'habileté, la pénétration et l'énergie ont doté le monde des fruits du génie inventif de tous ceux qui l'ont précédé, et lui ont ainsi acquis une renommée qui ne doit pas périr.

Fulton eut quelques rivaux actifs et entreprenants.

En 1801 ou 1802, Olivier Evans envoya à la Nouvelle-Orléans une de ses machines, d'environ 150 chevaux, qui devait servir à la propulsion d'un bâtiment appartenant à MM. Mackeever et Valcourt. Le bateau attendait le moteur qui fut effectivement installé à bord; mais les eaux étaient basses, et avant de faire les essais il fallait patienter quelques mois, jusqu'à ce que la rivière eût remonté. Les agents d'Evans, n'ayant pas de fonds suffisants pour attendre pendant un temps aussi long, furent amenés à retirer leur machine du bateau et à l'établir dans une scierie, où elle étonna tout le monde par la quantité de bois qu'elle débita.

Livingston et Roosevelt s'étaient aussi occupés d'expé-

riences de même nature, aussi tôt que Fulton et peut-être avant lui.

La victoire remportée par ce dernier lui fut disputée de très près par le colonel John Stevens de Hoboken, que nous avons déjà cité en racontant les origines des chemins de fer, et qui, depuis 1791, s'occupait d'expériences de ce genre. En 1789, il avait adressé une pétition à la législature de l'État de New-York, pour obtenir le privilège qui avait été accordé à Livingston, et dès lors il affirmait que ses plans et ses dessins étaient entièrement prêts.

En 1804, pendant que Fulton était en Europe, Stevens

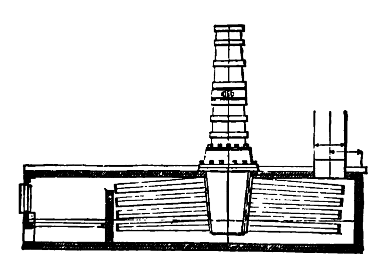


Fig. 80. — Coupe de chaudière à vapeur. 1804.

avait construit et équipé un bateau à vapeur de 68 pieds de long et 14 de large. Ce bâtiment réunissait une série de dispositions nouvelles et avantageuses, témoignant d'un remarquable talent inventif ainsi que d'une parfaite appréciation de la nature du problème que l'inventeur s'était proposé de résoudre. Sa chaudière (fig. 80) était du type connu maintenant sous le nom de chaudière à tubes à eau. Elle ressemblait beaucoup à quelques-unes de celles appelées aujourd'hui chaudières à compartiments, et contenait 100 tubes de 2 pouces de diamètre et 18 pouces de long, dont chacun, fermé à une extrémité, communiquait par l'autre avec un cylindre central plein d'eau et surmonté d'un tambour à vapeur. Les gaz du foyer passaient entre les tubes, dont la flamme léchait les parois, et qui contenaient l'eau à échauffer. La machine (fig. 81) était à *connextion directe*, à *haute pression*, et à condensation; elle avait un

cylindre de 10 pouces de diamètre, 2 pieds de course de piston, et faisait mouvoir une *hélice* à quatre branches et



Fig. 81. — Machine, chaudière et propulseurs à hélice employés par Stevens. 1804.

d'une forme qui, même aujourd'hui, semble excellente. L'ensemble constitue un échantillon très remarquable de machine ancienne. Un modèle de ce petit steamer, construit

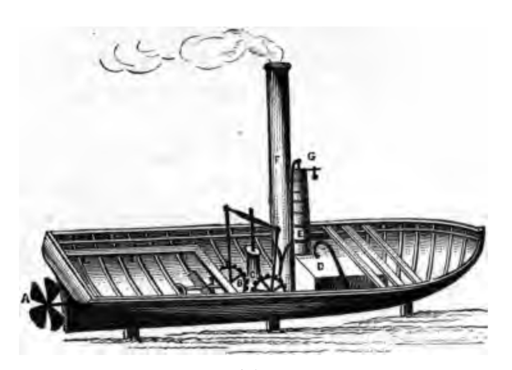


Fig. 82. — Steamer à hélice de Stevens. 1804.

en 1804, est conservé dans la salle des conférences de la section de mécanique à l'Institut de technologie Stevens ; et l'appareil moteur lui-même, avec sa chaudière tubulaire à haute pression, « à compartiments » ou « de sûreté », comme on l'appellerait aujourd'hui, sa machine à haute pression et à condensation, munie de tiroirs tournants, ses hélices jumelles, que nous venons de décrire, occupe une

place d'honneur dans le musée des modèles; il y fait un singulier contraste avec les machines fournies à la collection par les fabricants et inventeurs de notre temps. On voit aussi dans ce musée la branche et le moyeu d'une hélice unique, également employée avec la même machine.

Stevens semble avoir été le premier à reconnaître pleinement l'importance du principe appliqué dans la construction de la chaudière à compartiments. Son fils aîné, John Cox Stevens, était en Angleterre en 1805, et, pendant son séjour, il fit breveter une autre modification de ce type de chaudière. Dans la spécification jointe au brevet, il détaille à la fois la méthode de construction et les principes sur lesquels sont fondées les dispositions nouvelles. Il déclare qu'il décrit cette invention telle que son père la lui a expliquée, et il ajoute :

« Par une série d'expériences que M. Belamour exécuta en France en 1790, sous les auspices de l'Académie royale des sciences, il a été constaté que, dans une certaine limite, l'élasticité de la vapeur est presque doublée par chaque accroissement de température égal à 30° Farenheit. Ces expériences n'ont pas été poussées au delà de 280° F., température pour laquelle la force élastique de la vapeur fut trouvée égale à environ 4 fois la pression atmosphérique. Dans des expériences que j'ai récemment faites moi-même, l'élasticité de la vapeur à la température de l'huile bouillante, température évaluée à environ 600° F., a été trouvée égale à 40 fois la pression atmosphérique.

« Je ne puis certainement revendiquer la découverte de ce principe, qui régit la formation de la vapeur; mais quant à son application, d'après certaines règles, au perfectionnement de la machine à vapeur, j'y prétends un droit exclusif.

« Il est évident que, pour retirer avantage de l'application de ce principe, il est absolument nécessaire que le vaisseau ou les vaisseaux destinés à la génération de la vapeur aient une force suffisante pour résister à la haute pression que produit l'augmentation de la force élastique; mais cette pression augmente ou diminue suivant la capa-

cité du récipient. Le principe de l'invention consiste donc à constituer une chaudière au moyen d'un système ou d'une combinaison de petits vaisseaux, au lieu d'en employer un seul grand comme d'habitude, la force de résistance de la substance dont ces vaisseaux sont composés augmentant à mesure que leur capacité diminue. On comprend de suite qu'il existe une variété infinie de moyens d'effectuer de telles combinaisons; mais, par la nature même du problème, il est certaines limites au delà desquelles on ne peut pousser le perfectionnement dans cette voie. Dans la chaudière que je vais décrire, on l'a porté, je crois, à la dernière limite qu'il soit possible d'atteindre.

« Supposez une plaque de laiton de 1 pied carré, percée d'un certain nombre de trous; dans chacun de ceux-ci est fixée l'extrémité d'un tube de cuivre d'environ 1 pouce de diamètre et 2 pieds de long; les autres bouts de ces tubes sont implantés de la même façon dans une plaque semblable. On peut même, pour assurer l'étanchéité des joints, fixer les tubes aux plaques par moulage direct. Ces plaques doivent ensuite être recouvertes, à chaque bout des tubes, par un solide chapeau de fonte ou de laiton, de manière toutefois à laisser un espace d'un pouce ou deux, au-devant des extrémités des tubes, entre la plaque et le chapeau, qui doivent être fixés l'un à l'autre par des boulons et des écrous. L'eau d'alimentation nécessaire doit être injectée, au moyen d'une pompe foulante, dans un des chapeaux, et c'est par un tuyau fixé dans l'autre que la vapeur doit être amenée au cylindre de la machine; le tout doit être alors enfermé, comme d'habitude, dans un massif de briques ou autre maçonnerie, et disposé soit horizontalement, soit verticalement, comme on voudra.

« J'imagine que la chaudière ci-dessus décrite constitue le meilleur moyen d'appliquer le principe mentionné plus haut, et qu'il est inutile d'indiquer les modifications de forme et de construction qu'on peut adopter, d'autant que celles-ci peuvent être diversifiées de bien des manières. »

Des chaudières de l'espèce décrite dans la spécification que nous venons de reproduire furent employées

dans la locomotive construite par John Stevens en 1824-1825, et une d'elles existe encore dans les collections de l'Institut de technologie Stevens.

L'emploi d'une telle chaudière, il y a soixante-dix ans, est une chose encore plus remarquable que l'adoption d'un propulseur à hélice fort bien proportionné, trente ans avant que les travaux de Smith et d'Éricsson aient rendu l'hélice d'un usage général. Et cette combinaison, d'une originalité frappante, est une preuve manifeste de l'habileté mécanique de ce grand ingénieur, que ses efforts pour propager l'emploi des chemins de fer nous ont déjà montré homme d'État éclairé.

Le colonel John Stevens fit en 1812 le projet d'un bâtiment cuirassé d'une forme particulière, qu'a reproduite depuis un ingénieur écossais distingué, John Elder de Glasgow. Le système consistait en une coque ayant à peu près la forme d'une immense soucoupe, portant une puissante artillerie et protégée par des plaques de fer assez épaisses pour résister aux projectiles des plus lourds canons de l'époque. Ce navire était fixé à un pivot et ancré dans la passe qu'on voulait défendre. Une série d'hélices, situées au-dessous de la coque et abritées ainsi contre les coups de l'ennemi, étaient manœuvrées par des machines à vapeur et permettaient de donner au vaisseau un mouvement de rotation rapide autour de son centre. A mesure que chaque canon se trouvait amené dans la direction du but, il faisait feu, et on le rechargeait pendant qu'il accomplissait son évolution circulaire. Ce fut là probablement le premier cuirassé qui ait jamais été construit, et la première application du principe, maintenant bien connu, des « monitors ». Une reproduction en a été récemment essayée dans la marine russe, où elle a reçu le nom de *Popoffka.*

Le premier des bateaux de Stevens fonctionnait si bien, qu'il en construisit tout de suite un autre, en employant la même machine que précédemment, mais avec une plus grande chaudière, et en adoptant comme propulseur des *hélices jumelles,* c'est-à-dire un système que, bien des années plus tard, on a présenté comme nouveau et fréquemment

adopté. Ce bateau réussit assez bien pour prouver qu'il était possible de faire, de la navigation à vapeur, une entre-

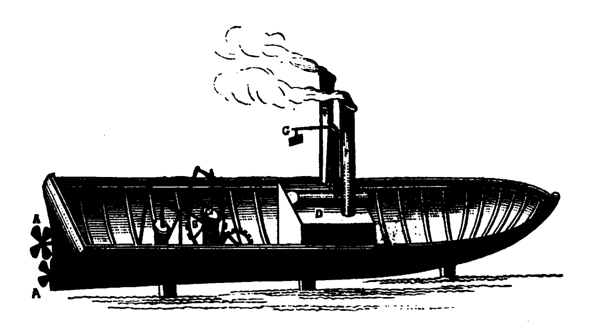


Fig. 83. — Steamer à hélices jumelles de Stevens. 1805.

prise commercialement avantageuse; Stevens, aidé de ses fils, construisit un bâtiment qu'il nomma le *Phénix,* et dont il fit l'essai en 1807, mais trop tard pour devancer Fulton. Ce bateau était mû par des roues à aubes.

Le *Phénix* se trouvant exclu des eaux de l'État de New-York, par suite du monopole dont Fulton et Livingston étaient en possession, fut employé quelque temps entre New-York et New-Brunswick; puis, dans l'espoir de réaliser des bénéfices plus considérables, on décida de l'envoyer à Philadelphie, pour le faire naviguer sur la Delaware.

A cette époque, il n'existait pas de canal qui permît de faire ce trajet par l'intérieur des terres; en juin 1808, Robert L. Stevens, un des fils de John, partit avec le navire pour le conduire par mer à sa destination. Quoiqu'il eût eu à essuyer un coup de vent violent, il arriva heureusement à Philadelphie, et eut ainsi la gloire d'avoir été le premier à oser s'aventurer en pleine mer sur un navire qui n'avait d'autre moteur que la vapeur.

Depuis lors les Stevens, père et fils, continuèrent de construire des bâtiments à vapeur; et quand les tribunaux eurent annihilé le privilège de Fulton, c'est de leurs chantiers que sortirent les meilleurs steamboats employés sur l'Hudson.

Après que Fulton et Stevens eurent ainsi ouvert la voie, la navigation à vapeur se répandit très promptement des deux côtés de l'Océan : le nombre de bateaux circulant sur le Mississipi fut bientôt assez considérable pour réaliser la prophétie d'Evans : que la navigation à vapeur finirait par dominer exclusivement sur ce fleuve.

C'est principalement au fils du vieux Stevens, Robert L.



Fig. 84. — Robert L. Stevens.

Stevens dont nous avons déjà parlé, que furent dues les améliorations et modifications successives qui amenèrent, vingt ans après Fulton et John Stevens, l'adoption du type aujourd'hui bien connu du « bateau fluvial américain » et de sa machine à vapeur. C'est à lui aussi qu'on doit les plans et la construction de la batterie Stevens, le premier cuirassé bien organisé qu'on ait jamais construit. Une grande partie de ses meilleurs travaux furent exécutés avant la mort de son père.

Il fit, sur la propulsion des bâtiments une foule d'expé-

riences aussi intéressantes qu'utiles, auxquelles il consacra beaucoup de temps et d'argent; et, bien des années avant qu'elles ne fussent généralement comprises, il était arrivé non seulement à connaître les lois qui régissent les variations de la résistance aux grandes vitesses, mais à déterminer et à réaliser pratiquement ces formes de moindre résistance et ces lignes gracieuses, que l'architecture navale n'a retrouvées que dans ces derniers temps.

Le président King semble avoir été le premier qui ait apprécié à sa juste valeur la somme énorme d'inventions originales et les mérites étonnants de cette famille d'ingénieurs. Parlant, dans une conférence faite à New-York en 1851, des immenses services qu'elle avait rendus à l'État, il a donné pour la première fois, de tous ces travaux, un compte rendu exact et complet, que presque tous les écrivains plus récents ont pris pour point de départ de leurs récits.

Le jeune Stevens commença vers 1804 ou 1805, et encore tout enfant, à travailler dans les ateliers de son père; c'est ainsi que, de très bonne heure, il acquit cette connaissance familière de tous les détails pratiques, si essentielle au succès. C'est lui qui introduisit dans le *Phénix* les courbes rentrantes à la flottaison, devançant ainsi les constructeurs des clippers de Baltimore, jadis si fameux, et les inventeurs de la forme dite « ligne d'onde » (*wave-line*), pour le tracé des carènes. Dans le même bâtiment il adopta une roue à palettes mobiles et l'armature protectrice qu'on voit maintenant à tous nos steamers fluviaux.

La disposition habituelle de ce système de palettes est représentée dans la figure 85. Le collier excentrique G, porté par le pivot H, monté sur le tambour à l'extérieur de la roue, ou bien un excentrique fixé au bâtiment, est relié par les tringles FF aux petits bras DD, qui font tourner les palettes autour des axes EE. A est le centre de la roue à aubes; CC sont les rayons, dont chacun porte une palette, et que relient entre eux des bandages circulaires. Ils forment ainsi un ensemble très solide et capable de résister à l'action des forces extérieures.

Le steamboat *Philadelphie* fut construit en 1813; et le jeune architecte profita de cette occasion pour appliquer un certain nombre de perfectionnements nouveaux, tels que les boulons à vis au lieu de chevilles et les équerres en

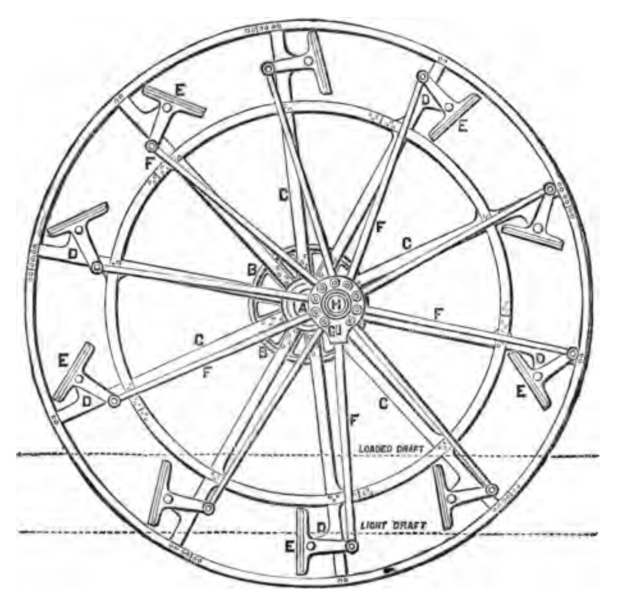


Fig. 85. — La roue à palettes mobiles.

bois et en fer. Deux ans après, il modifia les machines de ce bateau et les disposa pour utiliser la détente de la vapeur. Un peu plus tard, il commença à employer l'anthracite, découverte en 1791 par Philip Ginter, et dont on se servait, quelques années avant la Révolution, dans les forges de Wilkesbarre en Pensylvanie.

M. Fell, juge de cette ville, avait imaginé en 1808 une grille d'une forme particulière pour brûler ce combustible. Olivier Evans l'avait même employé dans des fourneaux, antérieurement à cette date, et, vers le même temps, il en avait été fait usage à Kingston dans le foyer à courant d'air forcé [1].

1. Bishop.

Stevens fut le premier dont il soit fait mention comme ayant entièrement réussi à utiliser, pour les machines à vapeur, ce combustible nouveau, presque impossible à conduire. Il disposa pour son emploi la chaudière du *Passaïc,* qu'il construisit en 1818, et l'adopta définitivement pour le chauffage des machines. La même année, il s'en servit dans un four à coupole, et l'usage en devint bientôt général dans les États de l'Est.

Stevens continua longtemps encore à travailler au perfectionnement de la machine à balancier. Il imagina le « balancier squelette », aujourd'hui d'un usage universel et l'un des traits caractéristiques de la machine américaine. Ce fut en 1822, sur le steamer *Hoboken,* qu'il appliqua pour la première fois ce dispositif aussi solide qu'élégant. Deux ans après, il construisit le *Trenton,* qui fut alors considéré comme un navire d'une beauté, d'une puissance et d'une rapidité extraordinaires. Il y avait placé les deux chaudières sur des « gardes »; et cet usage est encore général dans les bateaux fluviaux des États de l'Est. Dans ce bâtiment il adopta aussi l'emploi de palettes formées de deux parties placées l'une au-dessus de l'autre, la moitié supérieure étant fixée en avant et l'autre en arrière du rayon. Il obtint ainsi une action plus égale de la roue et moins de perte par les pressions obliques.

En 1827, il construisit le *North America* (pl. IX), un des plus grands et des mieux réussis de ses steamers. Ce bâtiment était muni de deux machines; chacune avait un cylindre de 44 pouces 1/2 de diamètre sur 8 pieds de course de piston, et faisait 24 révolutions par minute, ce qui donnait au navire une vitesse de 15 à 16 milles à l'heure. Prévoyant la difficulté de maintenir invariable la forme de ce long et mince navire, quand il serait irrégulièrement chargé et qu'il marcherait à la vitesse maxima que pouvait lui donner sa machine, il imagina d'en consolider la coque, au moyen d'une charpente de forme très simple. Et celle-ci, à qui on a donné le nom peu élégant, mais universellement employé, de « bâti à porcs » *(hog-frame)*, est encore une des particularités de tous les steamers fluviaux d'Amérique de

dimensions un peu considérables. Ce fut aussi dans le *North America* que Stevens introduisit pour la première fois le tirage artificiel pour les foyers : encore un autre détail d'un usage général aujourd'hui.

Reportant ensuite son attention sur la machine, il adopta dans la *New-Philadelphia*, en 1828, l'emploi de coussinets à ressort pour l'arbre des roues motrices, et il imagina pour le cylindre la soupape « à double siège », dont

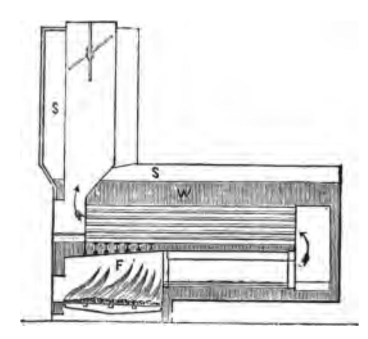


Fig. 86. — Chaudière tubulaire à retour de flamme de Stevens. 1832.

l'emploi est maintenant universel dans les machines à balancier. Elle consiste en deux soupapes à disque réunies par une tige. Ces disques sont de diamètres inégaux, le plus petit pouvant passer à travers l'orifice que ferme le plus grand. Quand la soupape repose sur son siège, la pression de la vapeur s'exerce sur la face supérieure du grand disque et sur la face inférieure du petit; il on résulte un équilibre presque complet et la possibilité de manœuvrer aisément à la main la soupape de la plus puissante machine. Les deux sièges se trouvent l'un au haut et l'autre au bas du tuyau qui conduit la vapeur dans le cylindre; quand la soupape est levée, la vapeur entre par les deux côtés à la fois, les deux courants se rejoignent et pénètrent ensemble dans le cylindre. On emploie le même genre de soupape pour l'échappement.

A peu près vers le même temps, Stevens construisit le

Le *North America* et l'*Albany*, 1827-1830.

système de chaudières tubulaires à retour de flamme, qui constitue encore le type actuel pour les pressions moyennes. Dans la figure 86, S est le réservoir de vapeur, W le réservoir d'eau, F le foyer. La direction suivie par les gaz et la fumée est indiquée par les flèches.

Quelques années plus tard (1840), Stevens commença à se servir, sur le *Trenton*, de pistons munis de garnitures à vapeur : la vapeur est admise, par des valves à réglage automatique, en arrière des segments métalliques ; la pression ainsi produite est plus efficace que celle des ressorts d'acier, habituellement employés alors, et encore en usage aujourd'hui, pour appliquer ces segments sur les parois du cylindre.

Les pistons, ainsi organisés, fonctionnèrent parfaitement pendant de longues années. Une collection des petites soupapes en laiton, qui ont servi dans un piston de cette espèce, est conservée dans les vitrines de l'Institut de technologie Stevens ; elles sont une preuve incontestable de l'ingéniosité dans la conception et du fini dans le travail qui distinguaient les machines construites sous la direction de ce grand ingénieur.

La « détente Stevens » (*Stevens cut-off*), si commune aujourd'hui, est un système particulier pour obtenir l'expansion de la vapeur, inventé en 1841 par Robert L. Stevens et un de ses neveux, M. Françis B. Stevens, héritier de l'aptitude pour la mécanique qui distinguait le premier de ces grands hommes. Dans cette forme d'appareil distributeur, les soupapes d'admission et d'échappement sont manœuvrées d'une façon indépendante par des excentriques spéciaux ; le dernier, disposé de la façon ordinaire, ouvre et ferme les passages de sortie juste au moment où la manivelle va franchir le point mort. L'excentrique d'admission, au contraire, est organisé de telle sorte que la soupape à vapeur s'ouvre comme d'habitude, mais se ferme quand le piston n'a fait qu'environ la moitié de sa course. Pour obtenir ce résultat, il suffit de donner au rayon d'excentricité une valeur plus grande que celle correspondant à la course du distributeur, et de laisser ce dernier indépendant de l'excentrique pen-

dant une partie de la révolution. Ainsi, dans la figure 87, soit AB la direction du mouvement de la tige de l'excentrique ; avec l'arrangement ordinaire, le distributeur ouvrirait la lumière quand l'excentrique est en OC et la fermerait en passant en OD. Dans le dispositif de Stevens, la soupape s'ouvre seulement quand l'excentrique atteint OE et se ferme quand il arrive en OF. L'autre soupape d'introduction,

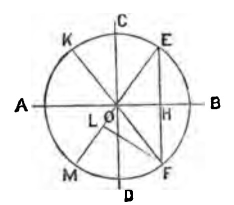


Fig. 87. — Mouvement.

à l'extrémité opposée du cylindre, est ouverte pendant que l'excentrique se meut de OM en OK. Entre K et E, comme entre F et M, les deux soupapes sont sur leurs sièges. HB représente la levée de la soupape, OA la course de la tige de l'excentrique pendant qu'elle est indépendante du distributeur. Pendant que la manivelle parcourt l'arc EF, la vapeur afflue dans le cylindre ; de F en M elle se détend. En M, le piston a terminé sa course et l'autre soupape s'ouvre. Le rapport $\frac{EM}{EL}$ donne la mesure de l'expansion.

Ce système de détente est encore d'un emploi très répandu, et on peut le voir sur presque tous les steamers des États-Unis qui n'ont pas la distribution Sickles.

Ce fut aussi vers cette époque que Stevens, ayant pris la suite des affaires de son père pour la construction des locomotives aussi bien que des machines de navigation, adapta la détente aux locomotives de la ligne Camden à Amboy, dont MM. Stevens étaient les principaux actionnaires. En même temps, il construisit des machines à huit roues pour les lourdes charges et adopta l'anthracite comme combustible. Ces dernières modifications réussirent

complètement, et le même perfectionnement fut apporté, en 1848, aux machines à grande vitesse.

La plus remarquable de toutes les applications de la vapeur imaginées par Robert L. Stevens fut celle connue sous le nom de batterie cuirassée à vapeur. Comme nous l'avons déjà dit, le colonel John Stevens avait proposé, dès 1812, de construire un cuirassé circulaire ou en forme de soucoupe, semblable à ceux exécutés, soixante ans plus tard, par la marine russe. Cette proposition n'eut pas de suite, bien que Robert eût repris cette idée, vingt ans après, sous une forme un peu différente. En 1813-1814, pendant la guerre avec l'Angleterre, il inventa, après de nombreuses et hasardeuses expériences, un *obus allongé* destiné à être lancé par les canons ordinaires à âme lisse. Ayant perfectionné cette invention, il en vendit le secret aux États-Unis, après avoir établi par des essais la puissance destructive de ces projectiles d'une façon si complète, qu'aucun doute ne pouvait rester sur leur efficacité.

Dès 1837, Robert avait achevé le plan d'un bâtiment de guerre cuirassé; et, en août 1841, ses frères James et Edwin écrivirent en son nom au secrétaire d'État de la marine, pour offrir de construire un cuirassé à grande vitesse, dont toute la machine eût été disposée au-dessous de la ligne de flottaison, et qui eût été muni de propulseurs à hélice entièrement immergés. L'armement devait se composer des canons rayés les plus puissants, se chargeant par la culasse et lançant des boulets et des obus allongés.

En 1842, ayant signé un traité avec le gouvernement des États-Unis, pour la construction d'un grand steamer organisé sur ce plan et qui devait être à l'épreuve des boulets, Robert L. Stevens fit faire un bateau à vapeur à Bordentown, dans le seul but de rechercher par expérience les formes les meilleures à donner aux ailes du propulseur et pour le comparer aux roues latérales. Ces essais durèrent plusieurs mois. Après quelques délais, pendant lesquels M. Stevens et ses frères avaient continué leurs études et perfectionné leurs plans, la quille d'un cuirassé fut enfin mise sur chantier, dans une cale sèche construite à grands

frais pour la circonstance. Ce bâtiment devait avoir 250 pieds de long, 40 de largeur de bau, 28 de creux, et une machine d'une puissance de 700 chevaux indiqués. L'épaisseur proposée pour la cuirasse était de 4 pouces 1/2 (0^m,115), la même qui fut adoptée dix ans plus tard par les Français pour leurs constructions relativement grossières.

En 1854, l'artillerie avait fait de tels progrès, que M. Stevens ne voulut pas continuer l'exécution des plans primitifs, craignant que le vaisseau une fois terminé ne fût pas invulnérable, ce qui aurait pu jeter du discrédit sur son auteur aussi bien que sur la marine américaine. Le travail, qui, pendant ces années de paix, avait progressé très lentement et avec des interruptions fréquentes, fut donc entièrement arrêté ; le vaisseau fut abandonné, et, la même année, un autre, d'une dimension et d'une puissance beaucoup plus considérables, fut mis en chantier. Il devait avoir 415 pieds de long, 45 pieds de bau et un peu plus de 5,000 tonnes de déplacement. L'épaisseur de cuirasse proposée était de 6 pouces 3/4 (0^m,17), soit 2 pouces 1/4 de plus que celle des premiers cuirassés français et anglais. La machine projetée par M. Stevens devait avoir une puissance indiquée de 8,624 chevaux, faire mouvoir des hélices jumelles et donner au vaisseau une vitesse d'au moins 20 milles à l'heure. Comme la première fois, la construction ne marcha que très lentement et fut souvent interrompue, le gouvernement tantôt fournissant des fonds, tantôt refusant de continuer le travail ; les administrations successives encourageaient et décourageaient alternativement l'ingénieur, si bien qu'enfin celui-ci, voulant se débarrasser de toutes relations officielles, continua le travail à ses frais.

Le génie remarquable du vieux Stevens se retrouvait tout entier dans le caractère de son fils ; et rien ne le prouve mieux que la précision avec laquelle furent adoptées dans ce grand vaisseau, tant pour la machine que pour la coque, ces formes et ces proportions qui, aujourd'hui même, c'est-à-dire vingt-cinq ans plus tard, sont encore reconnues comme les meilleures dans les conditions données. Les lignes du bâtiment sont d'une pureté

admirable; ce sont celles que J. Scott Russell a appelées « lignes d'ondes » ou trochoïdales, et que Rankine a démontrées être les plus favorables à la marche. Le rapport entre la longueur et la largeur au maître bau est bien celui qui doit donner la vitesse cherchée avec le minimum de résistance; et il coïncide exactement avec les proportions trouvées et adoptées d'un commun accord pour la navigation transocéanique, par les constructeurs les plus estimés, pour ne pas dire les plus radicaux.

Robert L. Stevens mourut en avril 1856, alors que ce grand vaisseau était presque achevé, la coque et la machine entièrement terminées; il ne restait plus qu'à appliquer la cuirasse, à arrêter la forme de la tourelle de combat, ainsi que le nombre et le calibre des canons. Cette mort interrompit encore une fois la construction du bâtiment, qui, pendant les années de paix, n'avait marché qu'avec lenteur, subissant des interruptions fréquentes, suivant que les administrations successives avaient jugé utile de fournir les fonds ou les avaient au contraire refusés, quand l'achèvement du travail ne semblait pas d'une nécessité immédiate.

Le nom de Robert L. Stevens restera honoré; il fut un des plus grands mécaniciens de l'Amérique, un des plus intelligents constructeurs de navires, le premier et l'un des plus actifs fauteurs de l'importante révolution qui s'est récemment produite dans les méthodes et l'outillage de la guerre maritime moderne. Il est rare qu'on ait rendu justice au génie mécanique des Américains et à l'habileté comme ingénieurs dont ils ont fait preuve. Aussi n'ai-je pas à m'excuser d'avoir tenté (comme d'autres le feront encore, je l'espère) d'éclairer une œuvre aussi magnifique que celle des Stevens d'une lumière assez vive pour en faire ressortir la variété, l'étendue et l'importance.

Pendant que Fulton faisait apparaître le steamboat sur les eaux de la baie de New-York et de l'Hudson, pendant que les Stevens père et fils créaient en peu de temps une flotte de steamers sur les eaux de la Delaware, d'autres mécaniciens se préparaient à leur disputer le terrain aussi-

tôt que l'occasion s'en présenterait, et que les actes législatifs constituant les monopoles seraient révoqués ou périmés.

Vers 1821, Robert L. Thurston, John Babcock et le capitaine Stephen T. Northam de Newport (Rhode Island), commencèrent à construire des steamboats et débutèrent par une petite embarcation destinée à servir de bac à Slade, sur un bras de la baie de Narragansett, près de la rivière de Fall. Ils construisirent ensuite des bateaux pour le détroit de Long Island. Une de leurs premières constructions fut le *Babcock*, exécuté à Newport en 1826. La machine sortait des ateliers de Thurston et Babcock à Portsmouth (Rhode Island). Richard Sandford s'était adjoint à eux et Northam fournissait les fonds. La machine avait 10 ou 12 pouces de diamètre de cylindre et 3 ou 4 pieds de course de piston. La chaudière était une variété de « chaudière tubulaire », type que Babcock fit breveter plus tard en 1824. L'eau était injectée dans cette chaudière, préalablement échauffée, au fur et à mesure de la formation de la vapeur; le générateur ne contenait pas une goutte de liquide.

Ce bateau fut remplacé, en 1827-1828, par un autre de plus grande dimension, la *Rushlight* (*Veilleuse*); la coque fut construite à Newport, et la machine à New-York, par James P. Allaire. Les chaudières de ces deux navires avaient des tubes de fonte. Le plus petit jaugeait 80 tonneaux; il allait de Newport à Providence, parcourant cette distance de 30 milles en 3 1/2 heures; il allait à New-York (175 milles) en 25 heures et en brûlant 1 3/4 cordes de bois[1]. Plus tard, Thurston et Babcock vinrent s'établir à Providence, où ce dernier ne tarda pas à mourir. Thurston continua de construire des machines dans cette ville pendant encore près d'un demi-siècle et mourut en 1873[2]. L'établissement qu'il avait fondé devint, après divers changements, l'usine de machines à vapeur de Providence.

1. *American Journal of science*, mars 1827; *London Mechanics' Magazine*, 16 juin 1827.
2. *New universal Cyclopædia*, t. IV, 1878.

James P. Allaire de New-York, la fonderie de West-Point, sur l'Hudson, Daniel Copeland et son fils Charles W. Copeland, sur le Connecticut, furent aussi parmi les premières maisons qui s'occupèrent de la construction des machines. Daniel Copeland fut probablement le premier (1850) qui adopta un tiroir à recouvrement pour produire la détente. Ses steamboats étaient alors habituellement des bâtiments avec roue à l'arrière, destinés à desservir différentes lignes sur le Connecticut et dans le détroit de Long Island. Charles W. Copeland fils se rendit à West-Point et, pendant son séjour dans cette ville, fit les plans de quelques grosses machines à vapeur marines ; plus tard, il dessina également ceux de plusieurs bâtiments de guerre à vapeur pour les États-Unis. Il fut le premier ingénieur qui ait construit, en ce pays, un steamer entièrement en fer, le *Siamois*, exécuté en 1838. Ce bâtiment était destiné à naviguer sur le lac Pontchartrain et le canal qui mène à la Nouvelle-Orléans. Il avait deux coques, 110 pieds de long et ne calait que 22 pouces en charge. Les deux machines, horizontales et sans condensation, faisaient tourner une roue à aubes unique, placée entre les deux coques, et imprimaient au bâtiment une vitesse de 10 milles à l'heure. Les coques étaient construites en tôles de 10 pieds de long forgées à chaud ; un fourneau spécial avait été construit pour cet objet. Les membrures étaient en fers à T, et ce fut sans doute la première application des fers de cette forme. Le même ingénieur, associé avec Samuel Hart, constructeur de navires bien connu, fit, en 1841, pour la marine des États-Unis, le steamer en fer *Michigan*, bâtiment de guerre destiné à naviguer sur les grands lacs du Nord ; il est encore en service et en très bon état. La coque a 162 pieds 1/2 de long, 27 de large, 12 1/2 de profondeur, et jauge 500 tonneaux. La membrure est en fers à T, renforcés par des revers en cornières. La quille a 5/8 de pouce d'épaisseur, les fonds 3/8 et les côtés 3/16. Les barrots sont en fer, et l'ensemble du bâtiment constitue un bon spécimen de navire en fer.

Pendant la période de 1830 à 1840, Copeland imagina

et fit adopter un grand nombre des détails qui sont devenus typiques dans la construction des machines et des bateaux à vapeur. Il fut probablement le premier à employer (sur le *Fulton* en 1840) une machine spéciale pour le ventilateur, lorsque le tirage artificiel était nécessaire. Il adopta l'usage de munir ses steamers de la « vidange de cale », qui permet, par l'emploi du condenseur et de la pompe à air, d'épuiser la cale d'un vaisseau en cas de voie d'eau. L'eau nécessaire à la condensation est alors prise à l'intérieur même du navire, au lieu de l'être dans la mer. C'est probablement là une idée américaine. Elle était en usage aux États-Unis avant 1835, comme l'était l'emploi de l'anthracite sur les steamers, qui fut appliqué par Copeland aux foyers des usines, aussi bien que pour les steamboats. Il modifia également la disposition de la soupape Stevens à double siège, en lui donnant une forme telle qu'il devint facile de l'ajuster et de l'entretenir.

En 1825, James P. Allaire de New-York construisit des machines combinées (*compound*) pour le *Henry Eckford*, et plus tard en établit de semblables pour divers autres steamers, dont un, le *Sun*, fit le voyage de New-York à Albany en 12 heures 18 minutes. Il employait la vapeur à 100 livres de pression. Dans la suite, Erastus W. Smith introduisit cette forme de machine sur les grands lacs et, postérieurement encore, elle fut adoptée sur les vapeurs anglais. La machine du steamer *Buckeye State* fut exécutée à l'usine Allaire de New-York en 1850, sur les dessins de John Baird et d'Erastus W. Smith, qui était chargé des plans et de la construction. En 1851, ce steamer fut placé sur la ligne de Buffalo, Cleveland et Détroit, où il donna des résultats très satisfaisants, puisqu'il ne consommait que les 2/3 du combustible nécessaire à un bâtiment semblable de la même ligne, muni de machines à cylindre unique. Les cylindres de la machine du *Buckeye State* étaient placés l'un dans l'autre, le cylindre extérieur à basse pression étant annulaire. Ils avaient respectivement 37 et 80 pouces de diamètre et la course des pistons était de 11 pieds. Les deux pistons étaient reliés à une traverse unique, et la

disposition générale de la machine rappelait la forme ordinaire à balancier. La pression de la vapeur était de 70 à 75 livres, c'est-à-dire à peu près le maximum adopté, un quart de siècle plus tard, sur les lignes transatlantiques. La vitesse n'était pas moins remarquable que l'économie de combustible.

En 1830, il y avait 86 steamers sur l'Hudson et dans le détroit de Long Island.

Pendant les premières années du XIXe siècle, l'introduction des bâtiments à vapeur sur les eaux des grands fleuves des États-Unis fut une des particularités les plus remarquables de leur histoire. Inaugurée par les essais infructueux d'Evans, la construction de steamboats pour ce service, une fois commencée, ne s'arrêta plus. Une génération s'était à peine écoulée depuis que Fitch était mort sur les rives de l'Ohio, et chaque jour venait accomplir son dernier vœu : de reposer là « où la chanson du batelier animerait le silence de son tombeau, où la douce musique de la machine à vapeur apaiserait son ombre ».

Nicolas J. Roosevelt fut, comme on l'a vu, le premier qui fit sillonner par un steamboat le cours des grands fleuves. Son bateau fut construit à Pittsburgh en 1811, sur les plans de Fulton, d'après un arrangement conclu avec celui-ci et Livingston. Il s'appelait la *Nouvelle-Orléans*, jaugeait environ 200 tonneaux et avait pour propulseur une roue à l'arrière, aidée par une voilure portée par deux mâts, quand les vents étaient favorables. La coque avait 138 pieds de long, 30 pieds de large, et le prix de l'ensemble, y compris la machine, était d'environ 40,000 dollars. Le constructeur avec sa famille, un ingénieur, un pilote et six « matelots de pont », partirent de Pittsburgh en octobre 1811 ; on atteignit Louisville en 70 heures (soit environ 10 milles à l'heure) et la Nouvelle-Orléans en 14 jours, à partir de Natchez.

Les steamers construits après celui-ci sur les eaux de l'Ouest furent probablement la *Comète* et le *Vésuve*, qui tous deux fonctionnèrent quelque temps. La *Comète* fut finalement démontée et sa machine employée à faire marcher

une usine, tandis que le *Vésuve* fut détruit par l'explosion de ses chaudières. Dès 1813, il y avait à Pittsburgh deux ateliers pour la construction des machines à vapeur. La construction des steamboats ne tarda pas à devenir, dans l'Ouest, une industrie importante et lucrative ; et on assure que dès 1840 il existait un millier de bâtiments à vapeur sur le Mississipi et ses affluents.

Dans le *Washington* construit à Wheeling (Virginie) en 1816, sous la direction du capitaine Henry M. Shreve, les chaudières, que jusque-là on avait placées dans la cale, furent établies sur le premier pont, et un pont volant construit au-dessus. Shreve remplaça par deux machines horizontales à connexion directe l'unique machine à vapeur verticale employée par Fulton, les fit marcher à haute pression sans condensation et agir, une de chaque côté du bâtiment, sur des manivelles disposées à angle droit. Il adopta la chaudière à carneaux d'Evans et un appareil distributeur à cames, produisant une détente considérable. A cette époque, le voyage de la Nouvelle-Orléans à Louisville exigeait trois semaines ; et des plaisanteries universelles accueillirent la prédiction de Shreve, quand il assura que sa durée finirait par être réduite à dix jours. On fait maintenant ce trajet en quatre jours. En 1817, le *Washington* fut saisi à la Nouvelle-Orléans par ordre de Livingston, qui prétendait que son privilège comprenait le monopole de la navigation du Mississipi et de ses affluents. Les tribunaux lui donnèrent tort, et, en prononçant la main-levée du *Washington*, ils firent disparaître le dernier obstacle qui s'opposait à l'introduction de la navigation à vapeur sur tout le territoire des États-Unis.

Le premier steamer des Grands-Lacs fut l'*Ontario*, construit en 1816, à Sackett's Harbourg. Quinze ans plus tard, les bateaux de l'Ouest avaient pris la forme particulière qu'ils ont généralement conservée depuis.

L'emploi de la machine à vapeur pour la navigation maritime se développa concurremment avec son adoption pour la navigation intérieure. Robert L. Stevens aux États-Unis, et ses contemporains Bell et Dodd en Angleterre,

commencèrent en 1808 la création de la flotte à vapeur de haute mer, dont l'importance s'accrut rapidement, au point qu'aujourd'hui elle a presque chassé de l'Océan les bâtiments à voiles. La navigation à vapeur transatlantique fut inaugurée, en 1819, par le steamer américain *Savannah,* de Savannah (Géorgie), qui se rendit à Saint-Pétersbourg en passant par la Grande-Bretagne et les ports du nord de l'Europe. Fulton avait fait, peu de temps avant sa mort, le plan d'un vaisseau qui devait naviguer sur la mer Baltique; mais les circonstances obligèrent à en changer la destination, et finalement il fut placé sur la ligne de Newport (Rhode Island) à New-York; de sorte que le *Savannah,* quelques années plus tard, accomplit le voyage que devait faire le navire de Fulton. Le *Savannah* jaugeait 350 tonneaux et avait été construit par la maison Crocker & Fickett, de Corlears Hook (New-York). Il fut acheté par M. Scarborough de Savannah, qui en confia le commandement au capitaine Moses Rogers, précédemment chargé de celui du *Clermont* et du *Phénix,* le bateau de Stevens. Le vaisseau, muni de sa machine à vapeur et de roues à aubes, partit le 27 avril 1819 pour Savannah, où il arriva en sept jours, après une heureuse traversée. De là il fit voile pour Liverpool le 26 mai, et atteignit ce port le 22 juin. Dans ce voyage, on se servit des machines pendant dix-huit jours, et le reste du temps on navigua à la voile. Le *Savannah* repartit le 23 juin de Liverpool pour la Baltique, touchant à Copenhague, Stockholm, Saint-Pétersbourg, et autres ports. Dans la capitale de la Russie, on débarqua lord Lyndock, qui avait pris passage à bord ; en prenant congé du commandant du steamer, cet hôte distingué lui fit présent d'une bouilloire à thé en argent, ornée d'une inscription indiquant l'importance de l'événement qu'elle était destinée à rappeler. Le *Savannah* quitta Saint-Pétersbourg en novembre, passa en vue de New-York le 9 décembre et atteignit Savannah cinquante jours après son départ. Il s'était arrêté quatre jours à Copenhague et autant à Arundel en Norwège. Le bâtiment essuya dans l'Atlantique plusieurs coups de vent assez violents, mais qui ne lui firent pas éprouver d'avaries sérieuses.

Le *Savannah* était un navire muni d'un gréement complet. Les roues étaient mues par une machine à basse pression, inclinée, à connexion directe, dont le cylindre avait 40 pouces de diamètre et le piston 6 pieds de course. Les roues à aubes étaient en fer forgé et attachées de façon à pouvoir au besoin être démontées et hissées à bord. Après le retour du *Savannah* aux États-Unis, la machine fut enlevée et vendue à l'usine Allaire de New-York. Les acheteurs exposèrent le cylindre à la « Foire universelle » (*World's fair*) de cette ville, trente ans plus tard. Le bâtiment fut employé comme voilier sur la ligne de New-York à Savannah, et finit par se perdre en 1822. A la voile et avec un vent modéré, il faisait, dit-on, 3 nœuds à l'heure, et à la vapeur 5 nœuds. Le combustible employé était du bois de pin, ce qui explique pourquoi l'on fut obligé de faire à la voile une partie du voyage transatlantique.

Renwick rapporte qu'un autre navire, gréé en vaisseau et muni d'une machine à vapeur, fut construit à New-York en 1819, pour faire le service entre cette ville et Charleston, puis jusqu'à la Nouvelle-Orléans et la Havane; il assure que ce navire réussit parfaitement comme steamer, ayant une bonne vitesse et se comportant fort bien à la mer. Toutefois l'entreprise échoua pécuniairement, et le vaisseau, dont on avait enlevé la machine, fut vendu au gouvernement brésilien. En 1823 le steamer *Entreprise* fit un voyage dans l'Inde, marchant à la voile ou à la vapeur, suivant que son approvisionnement en combustible le lui permettait. Le voyage dura quarante-sept jours. Malgré ces traversées transatlantiques heureusement effectuées et le succès complet des steamboats sur les fleuves et dans les ports, on continua jusqu'en 1838 à entendre des personnes, dont les paroles faisaient autorité, soutenir qu'il était tout à fait impossible pour des steamers de franchir l'Océan, sauf peut-être en se rendant des côtes d'Europe à Terre-Neuve ou aux Açores, pour y réapprovisionner leurs soutes, et reprendre ensuite leur course vers les grands ports d'Amérique. Pourtant cette même année deux vapeurs firent ce voyage. C'étaient : le *Sirius*, navire de 700 tonneaux et 250 che-

vaux, et le *Great Western* de 450 chevaux et 1,340 tonneaux. Ce dernier, construit pour ce service, était un bâtiment fort grand pour l'époque; il mesurait 236 pieds de long. Ses roues avaient 22 pieds de diamètre et 10 pieds de largeur dans le sens de l'axe. Le *Sirius* partit de Cork le 4 avril 1838, et le *Great Western* de Bristol quatre jours après. Tous deux arrivèrent à New-York le même jour, 23 avril : le *Sirius* dans la matinée et le *Great Western* dans l'après-midi.

Ce dernier bâtiment avait emporté de Bristol 660 tonnes de charbon. Sept passagers se décidèrent à profiter de l'occasion, et firent ainsi le voyage en moitié moins de temps que les paquebots à voile de cette époque. Pendant toute la traversée, on eut le vent et la mer presque directement contraires, et les deux bâtiments firent la même route dans des conditions très analogues. En arrivant à New-York, ils furent reçus avec le plus grand enthousiasme. Le canon des forts et des vaisseaux de guerre du port les salua; les navires marchands arborèrent leurs pavillons; les citoyens assemblés sur la Batterie et ceux qui vinrent à la rencontre des arrivants dans des milliers de bateaux de toutes formes et de toutes grandeurs, les acclamèrent joyeusement. Les journaux du temps furent remplis de relations du voyage, ainsi que de descriptions des steamers et de leur machine.

Quelques jours après, les deux bâtiments se mirent en route pour revenir en Angleterre; le *Sirius* atteignit heureusement Falmouth en 18 jours, et le *Great Western* ne mit que 15 jours pour arriver à Bristol. Ce dernier rencontra des vents debout, eut à lutter pendant une partie du voyage contre une tourmente violente et une mer très dure, au point de ne pouvoir faire que 2 nœuds à l'heure. Le *Sirius* fut jugé trop petit pour ces longues et pénibles traversées; il fut retiré et replacé sur la ligne de Londres à Cork, où il avait été précédemment employé. Le *Great Western* continua plusieurs années encore le service transatlantique.

Ces deux voyages inauguraient la navigation à vapeur transocéanique, qui depuis n'a fait que s'accroître en étendue et en importance. Depuis lors la vapeur n'a pas cessé

d'être employée pour ces voyages à travers l'Océan, qui ont pris aujourd'hui une si grande importance. Pendant les six années qui suivirent sa traversée d'essai, le *Great Western* traversa soixante-dix fois l'Atlantique, mettant en moyenne 15 1/2 jours pour aller d'Europe en Amérique, et 13 1/2 seulement pour le retour. La traversée la plus courte pour aller à New-York fut celle accomplie en 12 jours et 18 heures au mois de mai 1843; et la plus grande vitesse de marche à la vapeur relevée au loch avait été constatée, un an auparavant, dans une traversée où le navire vint de New-York en 12 jours et 7 heures.

Pendant ce temps, plusieurs autres steamers furent construits et affectés au service transatlantique. Parmi eux on peut citer le *Royal William*, la *British Queen*, le *Président*, le *Liverpool* et la *Great Britain*. Ce dernier, le plus beau de la flotte, fut lancé en 1843. Il avait 300 pieds de long, 50 de large et une machine de 1,000 chevaux. La coque était en fer et l'ensemble du bâtiment était un des meilleurs spécimens de l'architecture navale de cette époque. Après plusieurs voyages, ce vaisseau s'échoua sur la côte d'Irlande, où il resta plusieurs semaines; mais on finit par le renflouer, sans qu'il eût souffert de dégradations sérieuses; exemple remarquable de la solidité d'une coque en fer bien construite et formée de bons matériaux. Le bâtiment fut réparé et bien des années après il était encore à la mer, faisant le service des passagers et des marchandises pour l'Australie.

La « Ligne Cunard » de steamers transatlantiques fut établie en 1840. Son premier bâtiment, la *Britannia*, partit de Liverpool pour New-York le 4 juillet de cette même année, et fut suivi en départs réguliers par les trois autres navires avec lesquels la Compagnie débuta dans son entreprise. Ces quatre bâtiments jaugeaient ensemble 4,600 tonneaux et leur vitesse n'atteignait pas 8 nœuds. Aujourd'hui le tonnage d'un seul navire de la flotte Cunard surpasse celui de ces quatre vaisseaux réunis et le tonnage total est considérable. Il y a sur cette ligne 50 steamers, dont la puissance réunie équivaut à près de 50,000 chevaux. La

vitesse a doublé depuis 1840, et les traversées faites en huit jours ne sont pas rares.

La forme de machine à vapeur la plus employée à cette époque, sur les steamers transatlantiques, était celle connue sous le nom de « machine à balanciers latéraux ». Ce type fut adopté pour la première fois par MM. Maudsley et C[ie] de Londres, vers 1835, et construit par eux pour les steamers fournis au gouvernement anglais pour le service des dépêches.

La fig. 88 représente le vapeur l'*Atlantic*, construit

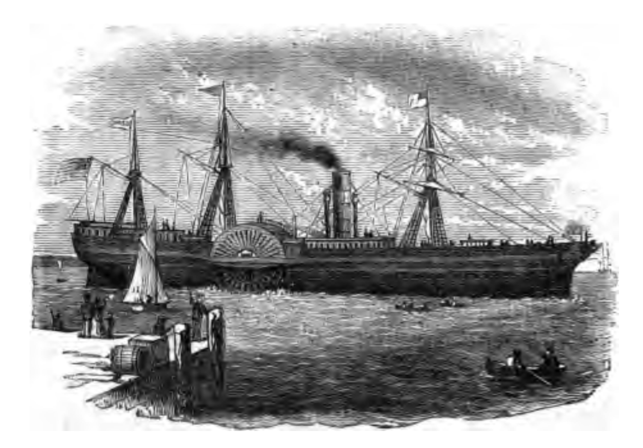


Fig. 88. — L'*Atlantic*. 1851.

peu après (1851) et qui fut le premier de la Compagnie américaine dite « Ligne Collins »; elle donne une idée des navires à vapeur d'alors. Ce premier bâtiment de la première des lignes américaines est un des plus beaux exemples du type des steamers à roues, qui ont finalement disparu devant les flottes à hélice modernes. La « Ligne Collins » ne vécut que quelques années; et sa chute fut probablement causée autant par le succès évident et inévitable de la propulsion à hélice que par la difficulté d'obtenir des capitaux suffisants, d'arriver à une organisation complète et à une direction générale bien comprise. L'*Atlantic* fut construit à New-York, la coque par William Brown et la

machine par l'usine Novelty. La longueur du navire était de 276 pieds, la largeur de bau de 45 et la profondeur de coque de 31 1/2 pieds. La largeur totale hors tambours était de 75 pieds. Le vaisseau jaugeait 2,860 tonneaux. La forme de la coque était remarquable par la beauté de ses lignes; l'avant était effilé, les courbes de l'arrière douces et gracieuses, et le tracé général aussi bien compris que possible pour un navire à grande vitesse. Le grand salon avait environ 70 pieds de long, et la salle à manger 60 de longueur sur 20 de large. Les cabines étaient disposées de chaque côté de celle-ci, et pouvaient recevoir 150 passagers. Ces bâtiments étaient installés avec luxe et inaugurèrent cet admirable système de transport pour les voyageurs, qui depuis s'est toujours fait remarquer par un confort et des commodités dont les Américains ont maintenant pris l'habitude.

La machine de ces vaisseaux était, pour l'époque, d'une puissance remarquable. Elle était du type à balanciers latéraux; la figure 89 représente celle du *Pacific*, exécutée par l'usine Allaire, sur les plans de M. Charles W. Copeland.

Dans ce type de machine, la tige du piston est, comme on le voit, attachée à une traverse qui se meut verticalement et que des bielles pendantes BC, disposées de chaque côté, relient aux balanciers latéraux DEF. Ces derniers oscillent autour d'un axe E, de la même manière que le balancier des machines ordinaires. A l'autre extrémité, une bielle GH actionne la manivelle IJ, qui fait tourner l'arbre J, supporté par une traverse et deux montants WW. Le condenseur M et la pompe à air Q sont disposés comme dans les autres machines, sauf les modifications qu'entraîne leur situation entre le cylindre A et la manivelle IJ. Les roues à aubes étaient de la forme « radiale » ordinaire, et protégées par des tambours si solidement construits, qu'ils furent rarement endommagés par les plus fortes mers.

Ces bâtiments surpassèrent pour un moment en vitesse et en confort tous les autres steamers maritimes, et accomplirent leurs voyages avec une grande régularité. Le *Baltic*

et le *Pacific* de cette ligne réalisèrent une durée minimum de voyage de 9 jours 19 heures.

Pendant la dernière partie de la période dont nous esquissons l'histoire, la machine à vapeur marine fut l'objet de modifications très nombreuses tant dans l'ensemble que

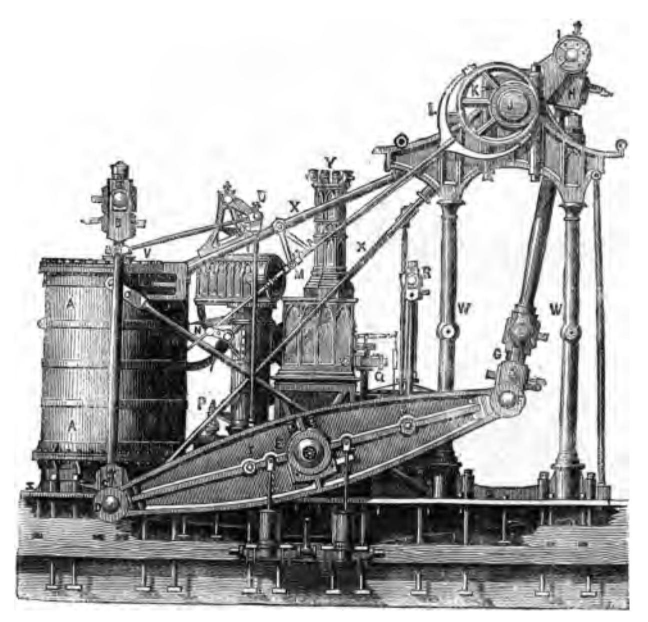


Fig. 89. — La machine à balanciers latéraux. 1819.

dans les détails ; en même temps, une révolution complète s'effectuait dans le mode de propulsion. Il en résulta l'adoption universelle d'un nouvel organe, qui fit disparaître de l'Océan tous les steamers à roues. La *Great Britain* était déjà un navire à hélice.

Comme nous l'avons dit ailleurs, l'hélice fut probablement proposée pour la première fois par le docteur Hooke en 1681, puis par le docteur Bernouilli de Groningen vers le milieu du XVIIIe siècle, et par Watt en 1784. Elle ne fut essayée expérimentalement qu'à la fin du siècle, en France par Dallery, aux États-Unis par John Fitch et par David

Bushnell, ingénieux inventeur, occupé alors à faire sur les torpilles des expériences qui amenèrent l'incident auquel doit son origine la fameuse chanson de Francis Hopkinson : *la Bataille des coques*. Cet ingénieur américain employa l'hélice comme propulseur d'un de ses bateaux sous-marins.

Le 9 mai 1785, l'Anglais Joseph Bramah fit breveter un propulseur à hélice, identique, comme dispositions générales, avec ceux dont on se sert aujourd'hui. Son dessin nous montre une hélice dont le tracé paraît très heureux ; elle est portée sur un arbre horizontal qui sort du navire en traversant un *stuffing-box*, et se trouve entièrement noyée. Bramah ne semble pas avoir mis en pratique ce système, que firent aussi breveter en Angleterre Littleton en 1794 et Shorter en 1800.

Toutefois John Stevens fut le premier à donner à l'hélice une forme pratiquement utilisable, et l'employa avec succès en 1804 et 1805, sur les bateaux à hélices simples ou jumelles qu'il construisit à cette époque. Vers le même temps aussi, cet engin de propulsion fut essayé par Trevithick, qui fit le plan d'un bâtiment dont le moteur devait être une machine à vapeur actionnant une hélice. Son système fut présenté au ministère de la marine en 1812. Son navire devait avoir une coque en fer. Francis Pettit Smith essaya aussi l'hélice en 1808 et postérieurement encore.

Joseph Ressel, ingénieur originaire de Bohême, proposa vers 1812 d'employer l'hélice à faire mouvoir les ballons, et en 1826 il en recommanda également l'usage pour la marine. On dit qu'en 1829 il construisit à Trieste un bateau à hélice, qu'il nomma la *Civette*. Un accident arriva à cette petite embarcation dans son voyage d'essai, et les choses n'allèrent pas plus loin.

L'hélice fut enfin généralement adoptée, grâce aux efforts de l'habile ingénieur suédois John Ericsson, qui résidait en Angleterre en 1836, et d'un fermier anglais, M. F.-P. Smith. Ericsson fit breveter une forme particulière de propulseur à hélice, et dessina un steamer de 40 pieds de long, de 8 pieds de large et qui calait 3 pieds d'eau. L'hélice était double ; il y avait deux arbres placés l'un dans

l'autre, tournant en sens inverse, et portant l'un une hélice *dextrorsum*, l'autre une hélice *sinistrorsum*. Ces deux hélices avaient 5 1/4 pieds de diamètre. Dans son voyage d'essai, ce petit steamer atteignit une vitesse de 10 milles à l'heure. Sa puissance comme remorqueur fut trouvée très satisfaisante; il remorqua un schooner de 140 tonneaux à raison de 7 milles à l'heure, et put amener dans la Tamise le grand paquebot américain *Toronto* avec une vitesse de 5 milles.

Ericsson s'efforça d'intéresser l'Amirauté britannique à ses études, et tout ce qu'il obtint fut d'emmener avec lui les lords de l'Amirauté dans une excursion sur le fleuve. Le nouveau système n'éveilla aucun intérêt, et rien ne fut fait par les autorités maritimes. Le capitaine Beaufort, un des excursionnistes, se contenta d'écrire à l'inventeur une note dans laquelle il disait que les résultats obtenus avec ce petit bâtiment n'avaient pas répondu aux espérances et à l'attente de ses collègues. Tous les intérêts des ateliers de construction de machines à vapeur qui existaient alors étaient opposés à l'innovation proposée. Et le conservatisme proverbial des marins et de l'administration de la marine contribua à faire rejeter les plans d'Ericsson.

Heureusement pour les États-Unis, il se trouva qu'à cette époque ils avaient en Angleterre des représentants de l'ordre civil et maritime aussi hardis qu'intelligents. Le consul à Liverpool, M. Francis B. Ogden, de New-Jersey, connaissait quelque peu les machines et la navigation à vapeur. Il avait vu, longtemps auparavant, les plans d'Ericsson, et en avait immédiatement apprécié la valeur. Il eut assez de confiance dans le succès pour mettre des capitaux à la disposition de l'inventeur. Le petit bateau à hélice dont nous venons de parler fut construit avec des fonds dont il avait fourni une partie, et baptisé, en son honneur, du nom de *Francis Ogden*.

Le capitaine Robert F. Stockton, officier de la marine des États-Unis, originaire aussi du New-Jersey, se trouvait alors à Londres et fit, avec Ericsson, une excursion sur l'*Ogden*. Il fut immédiatement convaincu des avantages

de cette nouvelle méthode et commanda à l'ingénieur deux steamboats en fer à hélice pour les États-Unis. C'est alors qu'Ericsson fut amené par MM. Ogden et Stockton à venir habiter dans ce pays[1]. L'*Ogden* fut envoyé à la voile en Amérique, en avril 1839, et vendu à la Compagnie du canal de la Delaware au Raritan. Son nom fut changé, et sous celui de *New-Jersey* il resta longtemps en service.

Le succès du bateau construit par Ericsson était si évident que, malgré l'inertie des autorités navales anglaises, une Compagnie particulière se fonda en Angleterre en 1839, pour exploiter les brevets de F.-P. Smith. Cette « Compagnie pour la propulsion des navires » *(Ship-propeller Company)*, construisit un bâtiment d'expérience appelé l'*Archimède*, dont le voyage d'essai eut lieu le 14 octobre de cette même année. La vitesse obtenue fut de 9,64 milles à l'heure. C'était, sous tous les rapports, un résultat satisfaisant; le navire fit un grand nombre de voyages d'un port à l'autre et finit par accomplir le tour de la Grande-Bretagne. Pourtant l'entreprise ne réussit pas financièrement, et la Compagnie perdit beaucoup sur la vente du bâtiment. L'*Archimède* avait 125 pieds de long, 21 pieds 10 pouces de large, tirait 10 pieds d'eau et jaugeait nominalement 232 tonneaux. Les machines avaient une puissance de 80 chevaux. Smith avait fait ses premières expériences en 1837, avec une petite embarcation de 6 tonneaux, mue par une machine dont le cylindre avait 6 pouces de diamètre et le piston 15 pouces de course. Un banquier de Londres, M. Wright, avait fourni les fonds nécessaires.

Bennett Woodcroft avait aussi expérimenté l'hélice dès 1832 sur l'Irwell, près de Manchester, dans un bateau de 55 tonneaux. Il employait des hélices jumelles à pas progressif, ayant chacune deux pieds de diamètre, et tournant en sens opposés. La vitesse atteignit 4 milles à l'heure.

Des expériences faites plus tard (en 1843) sur l'hélice à pas progressif, concurremment avec l'hélice à pas constant de Smith, établirent très nettement la supériorité de la

1. Cet inventeur distingué réside encore à New-York (1878).

première et contribuèrent à faire découvrir les proportions les plus convenables pour obtenir le maximum d'efficacité. Dans des spécimens postérieurs de l'hélice Woodcroft, on fit même les branches mobiles et ajustables à volonté, méthode encore en usage aujourd'hui et qui sous certains rapports a été reconnue fort avantageuse.

En arrivant aux États-Unis, Ericsson eut presque immédiatement l'occasion de construire le *Princeton*, grand steamer à hélice; vers la même époque, les gouvernements français et anglais firent aussi exécuter des bâtiments à vapeur d'après ses plans, ou d'après ceux de son agent en Angleterre, le comte de Rosen. Dans ces derniers navires, l'*Amphion* et la *Pomone*, on fit usage des premières machines horizontales à connexion directe qui aient jamais été construites; elles étaient munies de pompes à air à double effet, avec soupapes en toile, et comportaient d'autres détails nouveaux. La grande supériorité dont firent preuve ces bâtiments sur les steamers à roues du temps fut, pour la propulsion à hélice, ce que dix ans auparavant la locomotive de Stephenson, la *Fusée*, avait été pour la locomotion sur les chemins de fer.

En 1839, le Congrès avait autorisé la construction de trois bâtiments de guerre, et le secrétaire d'État de la marine ordonna l'année suivante d'en exécuter immédiatement deux. L'un était le *Princeton*, dont la machine fut dessinée par Ericsson. Sa longueur était de 164 pieds, sa largeur de 30 1/2 et sa profondeur de 21 1/2. Il tirait de 16 1/2 à 18 pieds d'eau et déplaçait de 950 à 1050 tonneaux. La coque, large et plate au fond, avait les extrémités fines et les lignes en étaient considérées à l'époque comme remarquablement belles.

L'hélice était en bronze à canon, à six branches, et avait 14 pieds de diamètre. Le pas était de 35 pieds; c'est-à-dire que s'il n'y avait pas eu de recul, et que l'hélice eût tourné dans un écrou solide, le bâtiment aurait avancé de 35 pieds à chaque révolution.

Il y avait deux machines d'une forme toute particulière: le cylindre était, en réalité, un demi-cylindre portant un

axe autour duquel oscillait, comme une porte sur ses gonds, un piston rectangulaire, qui recevait alternativement sur ses deux faces l'action de la vapeur. Cet arbre portait, à son extrémité extérieure, un bras qui, au moyen d'une bielle, agissait sur la manivelle et constituait ainsi une machine à connexion directe.

Le tirage des foyers était activé par une soufflerie. Ericsson avait adopté cette méthode de tirage artificiel, dix ans auparavant, dans le *Corsaire*, un de ses premiers navires. Le *Princeton* portait un canon de 12 pouces en fer forgé. Cette bouche à feu fit explosion après quelques coups d'essai ; accident désastreux qui causa la mort de plusieurs personnes distinguées, parmi lesquelles se trouvaient des membres du cabinet du Président.

Le *Princeton* fut, comme steamer à hélice, un véritable succès; il atteignit une vitesse de 13 nœuds, qui passait alors pour très remarquable. Le capitaine Stockton, qui le commandait, était enthousiasmé de son bâtiment.

Ce fut le signal d'une révolution immédiate dans la construction des navires, tant pour la marine marchande que pour la marine militaire. Le *Princeton* fut le premier spécimen de ces bâtiments à hélice, qui maintenant ont entièrement pris la place des vapeurs de l'ancien type. L'usage de l'hélice se répandit dès lors avec une grande rapidité. En 1841, 6 steamers seulement étaient munis de l'hélice d'Ericsson ; il y en avait 9 en 1842 et près de 30 en 1843.

En Angleterre, en France, en Allemagne, et dans les autres pays de l'Europe, la révolution finit par s'accomplir également et ne fut pas moins complète. Presque tous les bâtiments de mer, construits vers la fin de la période que nous étudions, furent des steamers à hélice, munis de machines à connexion directe et à marche rapide. Il s'écoula toutefois bien des années avant que les ingénieurs eussent acquis, dans l'établissement, l'exécution et la direction de ces nouvelles machines, l'expérience nécessaire pour les accommoder convenablement aux différents services auxquels ils avaient à les appliquer. Entre autres modifica-

tions apportées par Ericsson aux anciens systèmes, il faut citer le condenseur par surface, avec pompe à circulation manœuvrée par une petite machine indépendante.

On constata que l'hélice possédait, comme organe de propulsion, de nombreux avantages sur la roue à aubes. Son emploi réduisait beaucoup le prix de la machine; et si les frais d'entretien se trouvaient un peu augmentés, ce désavantage était plus que compensé par l'immense économie que les machines à hélice permettaient de réaliser dans la marche des bâtiments.

Quand un navire est mû par des aubes, son mouvement produit, par suite du frottement contre l'eau, des flancs et du fond, un courant dirigé dans le sens de la marche, qui suit le vaisseau pendant quelque temps, en diminuant peu à peu de vitesse, et finit par la perdre tout entière au contact de la masse liquide ambiante. La force employée à produire ce courant est, dans le steamer à aubes, entièrement perdue. Dans les navires à hélice, au contraire, le propulseur fonctionne au milieu même du fluide entraîné, et son action tend précisément à le ramener au repos. Il reprend donc ainsi et utilise une grande partie de cette force qui, autrement, eût été perdue. De plus l'hélice est complètement immergée et agit, en conséquence, d'une façon plus efficace. Sa rotation est douce et rapide, ce qui permet l'emploi de machines petites, légères et à grande vitesse. Cette dernière circonstance apporte une économie de poids et d'espace; non seulement elle épargne les frais de transport de tout l'excès de poids qu'aurait une machine plus volumineuse, mais l'espace ainsi rendu libre pouvant être employé au chargement d'une cargaison rémunératrice, le bénéfice se trouve en réalité doublé. En outre les machines à grande vitesse sont, toutes choses égales d'ailleurs, celles qui consomment le moins de vapeur; d'où économie de combustible, économie du poids et de la place qu'il occuperait à bord et que peut remplacer encore la marchandise transportée. La substitution de l'hélice aux roues se trouva donc produire un bénéfice direct considérable. Enfin elle eut encore indirectement quelques autres avan-

tages, comme celui de débarrasser le pont d'une machine encombrante et de l'arbre des roues, de permettre un meilleur arrimage de la cargaison, une plus grande facilité d'établir et d'employer les mâts et la voilure. Les énormes tambours des roues fixés aux flancs du navire, en prise au vent et à la mer, entravaient beaucoup la marche, et leur suppression est encore un avantage incontestable.

Pendant quelques années, l'hélice fut regardée généralement comme un simple auxiliaire des voiles. Plus tard, elle devint au contraire le moteur essentiel. Les bâtiments simplifièrent leur gréement et diminuèrent la surface de leur voilure, qui ne fut plus à son tour qu'un simple auxiliaire de la machine à vapeur.

En novembre 1843, le steamer à hélice *Midas*, capitaine Poor, petit bâtiment gréé en schooner, partit de New-York pour la Chine. C'était probablement le premier voyage d'une telle étendue entrepris par un navire à vapeur. Au mois de janvier suivant, l'*Edith*, capitaine Lewis, bâtiment à hélice gréé en barque, partit du même port pour l'Inde et la Chine. Le *Massachusetts*, capitaine Forbes, vapeur à hélice d'environ 800 tonneaux, partit pour Liverpool le 15 septembre 1845. C'était le premier voyage d'un transatlantique américain portant des passagers, depuis l'expédition aventureuse du *Savannah*, un quart de siècle auparavant. Deux ans après, grâce surtout aux efforts du capitaine R.-B. Forbes, des entrepreneurs américains avaient introduit les steamers, tant à hélice qu'à roues, sur les fleuves de la Chine ; et la navigation à vapeur se trouvait définitivement établie d'un bout à l'autre du globe.

Quand on compare les steamers à hélice d'aujourd'hui avec les meilleurs types de steamers à roues, leur supériorité est tellement marquée, qu'on peut être surpris du temps qu'il a fallu pour accomplir cette transformation. La cause en est sans doute que cette révolution en entraînait une autre complète dans l'organisation des machines marines, par suite de la substitution, à des roues tournant lentement, d'une hélice qui doit être au contraire animée d'un mouvement très rapide. Remplacer de lourdes machines, dont

les pistons énormes parcouraient lentement une longue course, par d'autres bien plus légères, dont les cylindres devaient être petits et les pistons animés d'une grande vitesse, c'était une transformation qui ne pouvait s'accomplir que peu à peu et devait forcément être accompagnée d'erreurs et d'accidents, inévitables dans ces époques de transition. Il fallait d'abord que les ingénieurs apprissent à organiser des machines satisfaisant aux nouvelles conditions qu'imposait l'emploi de l'hélice; et l'expérience nécessaire ne pouvait être acquise qu'au prix d'une foule de mésaventures et d'échecs coûteux. Les meilleures proportions à donner à la machine et au propulseur pour chaque bâtiment ne purent être déterminées qu'après de longs tâtonnements, malgré les grands services qu'a rendus, à ce point de vue, la série très complète d'expériences exécutées avec le steamer français le *Pélican*. Il fallut aussi former un corps de mécaniciens capables de conduire ces nouvelles machines; car elles exigeaient des soins et une habileté sans exemple.jusqu'alors. Enfin, tout en satisfaisant à ces conditions indispensables de succès, il fallut encore faire comprendre au public, gens du métier ou autres, les avantages réels du nouveau système. C'est pour toutes ces raisons que l'hélice eut besoin d'un temps considérable pour conquérir sa place légitime et supplanter définitivement la roue à aubes, qui finit par ne plus être employée que dans les eaux peu profondes.

Aujourd'hui nos grands steamers à hélice surpassent en vitesse tous ceux à roues qui parcourent encore l'Océan, et sont bien plus économiques; cette économie est due non seulement à l'emploi d'un propulseur plus efficace et aux modifications déjà décrites, mais aussi à d'autres perfectionnements apportés aux machines motrices. Dans les premiers temps de l'adoption de l'hélice, on en était encore pour la vapeur à des pressions de 5 à 15 livres (par pouce carré); on se servait de machines à engrenages, munies de condenseurs à injection, et dans lesquelles, pour obtenir une puissance d'un cheval, il fallait brûler par heure de 7 à 10 livres de charbon et même davantage. Un peu plus

tard vinrent les machines à connexion directe, toujours avec condensation par injection, mais avec des pressions de 20 livres et qui ne demandaient plus que 5 à 6 livres de charbon par cheval et par heure; puis l'adoption de la détente amena des pressions un peu plus fortes, et l'économie de combustible s'accrut encore. L'introduction du condenseur par surface, qui commença à se répandre il y a une dizaine d'années, fit descendre la consommation des meilleures machines à 3 ou 4 livres. A peu près vers la même époque, ce mode de condensation aida beaucoup à triompher des difficultés provenant de l'incrustation des chaudières, qui jusque-là s'étaient opposées à ce qu'on dépassât des pressions de 25 livres par pouce carré. Les ingénieurs ayant démontré que les dépôts calcaires dans les chaudières marines sont dus plutôt à la température qu'au degré de concentration, et que toute la chaux qui pénètre dans le générateur s'y dépose à la pression que nous venons d'indiquer, il en résulta tout de suite un progrès important. Une disposition rationnelle, un travail d'exécution plus parfait et une direction mieux comprise du condenseur par surface en firent un instrument très efficace; les dangers des incrustations se trouvant ainsi diminués, on s'achemina de nouveau vers les hautes pressions; aujourd'hui, des pressions de 75 livres par pouce carré sont d'un usage très courant, et l'on a même dépassé parfois 125 livres.

La fin de cette période fut donc marquée par la construction des types les mieux réussis de steamers à roues, le succès complet de la navigation à vapeur transocéanique, l'adoption de l'hélice et du type spécial de machines que son usage comporte, et enfin par un progrès général dans le sens des mouvements rapides, qui conduisit à l'emploi de pressions plus élevées, d'une détente plus considérable, de machines plus légères travaillant plus vite, comme aussi de dispositions mieux comprises, d'une construction plus parfaite et de matériaux de meilleure qualité. Ces modifications se traduisirent par une diminution des frais de premier établissement et d'entretien, par une augmen-

tation de la vitesse, une plus grande sécurité pour les passagers et une diminution des risques de la cargaison.

L'adoption de ces perfectionnements eut enfin pour résultat le dernier changement considérable apporté à la forme des machines marines, et une révolution qui, commencée dans les dernières années de cette période, ne s'acheva que dans la suivante. L'insuccès de Hornblower, de Wolff et de plusieurs autres, qui avaient essayé d'introduire le système « compound » ou à double cylindre dans les machines établies à terre, n'avait pas convaincu tous les ingénieurs de l'impossibilité de trouver, dans une machine de cette espèce, un rival heureux au type alors en usage ; et les trois ou quatre steamers construits pour l'Hudson à la fin du premier quart du XIXe siècle eurent, dit-on, un succès complet. Le *Swiftsure* et ses contemporains, dont les chaudières travaillaient à des pressions de 75 à 100 livres, se trouvaient en mesure de faire réussir ce genre de machines au point de vue économique. On en construisit de temps à autre quelques-unes entre 1825 et 1850 ; mais c'est seulement après la fin de la période dont nous étudions l'histoire dans ce chapitre que ce type fut définitivement admis. Toutefois ce progrès, le plus grand et le dernier réalisé en ce qui concerne les machines marines, avait pris naissance très peu de temps après la mort de Watt ; et il fallut ainsi près d'un demi-siècle pour en amener la complète réalisation.



LIVRE VI

LA MACHINE A VAPEUR ACTUELLE (1850-1878).

« ... Et enfin vient l'action puissante de la vapeur, avec sa force sans égale, avec le sifflement d'une trombe. Que de siècles de progrès, quand on songe au passé, ce seul agent nous a permis de condenser dans le court espace de cinquante années ! Partout applicable, partout efficace, son bras est mille fois plus fort que celui d'Hercule, et le génie de l'homme sait y adapter mille fois plus de mains que n'en avait le géant Briarée. La vapeur est la reine des mers, et grâce à son impulsion vigoureuse le vaillant navire

Contre les vents et les flots furieux
Poursuit tranquillement son cours victorieux.

La vapeur règne sur les fleuves, et le batelier peut laisser reposer ses rames; elle règne sur les routes et s'y charge de tous les transports ; elle règne au fond des mines, à mille pieds au-dessous de la surface du sol ; elle règne dans les usines et les ateliers de l'industrie. Elle rame, elle pompe, elle creuse, elle porte, elle tire, elle soulève, elle forge, elle file, elle tisse, elle imprime. Elle semble dire à l'homme, au moins à l'artisan : « Laisse là le tra-« vail de tes bras ; cesse d'épuiser ton corps en efforts pé-« nibles ; tu n'as besoin que de ton adresse et de ta raison « pour diriger ma puissance, et je prendrai pour moi la fa-« tigue, moi qui n'ai pas de muscles qui s'engourdissent, « de nerfs qui se reposent, de poitrine qui puisse défail-« lir. » Peut-on prévoir quels perfectionnements nouveaux pourra revêtir cette force étonnante ? Peut-on chercher à les deviner ? Tout ce qu'on peut affirmer, c'est qu'elle a profondément modifié la face du globe, et qu'on n'aperçoit encore aucune limite à ses progrès dans l'avenir. » — DANIEL WEBSTER.

Vers le milieu du présent siècle, comme nous l'avons vu, la machine à vapeur avait été appliquée avec succès à toutes les grandes fonctions auxquelles elle était apte. Son premier usage avait été l'élévation de l'eau; puis on s'en était servi pour donner le mouvement aux usines et aux mécanismes de toute sorte, et finalement elle était devenue, sur terre et sur mer, l'agent propulseur par excellence.

Au début de la période que nous abordons maintenant,

le public et les ingénieurs étaient familiarisés avec ces applications diverses. Le genre de machine à adapter à chaque usage était déterminé, et les différents types avaient déjà reçu plus ou moins exactement la forme et les proportions que nous leur voyons aujourd'hui. Par l'expérience plutôt que par la théorie, — car celle de la machine à vapeur n'avait encore été que peu étudiée, et les lois thermodynamiques qui la régissent n'avaient pas été formulées définitivement, — les constructeurs les plus intelligents avaient découvert les principes essentiels au succès pratique. Ils avaient appris peu à peu à reconnaître la valeur relative des nombreux modèles de machines, et les avaient ramenés à un petit nombre de types, spécialement consacrés à certaines méthodes d'utilisation de la force.

Aussi, pendant les années postérieures à 1850, nous ne rencontrons dans le développement de la machine à vapeur ni changement des formes originaires, ni addition d'organes nouveaux, mais un perfectionnement graduel des dispositions, des proportions et des arrangements de détail. Cette période a été surtout marquée par la disparition des types les moins aptes à soutenir la lutte avec leurs concurrents, et la conservation de ces derniers nous offre véritablement un exemple de « la survivance des mieux organisés ». Ces années ont donc été une période de raffinement.

Pendant cette période, les inventions n'ont porté que sur les détails. Elles ont produit de nouvelles formes et de nouveaux modes de disposition des organes. Les inventeurs ont imaginé d'innombrables variétés de soupapes, d'appareils distributeurs et régulateurs, et des variétés plus nombreuses encore de chaudières et d'accessoires, essentiels ou non, tant à ces chaudières qu'aux machines. La plupart de ces dispositifs particuliers n'ont guère de valeur, et un grand nombre des meilleurs se valent à fort peu près. Tous les bons systèmes de machine, quand ils sont également bien construits et dirigés, donnent des résultats sensiblement égaux. Il en est de même des types de générateurs

les plus connus, pour peu que le rapport de la surface de grille à celle de chauffe y soit identique et que le tirage et la circulation de l'eau y soient bien assurés. On a reconnu que, pour obtenir des résultats satisfaisants au point de vue économique, la possession de sérieuses connaissances théoriques et pratiques est également nécessaire à ceux qui se servent d'une chaudière, à ceux qui la construisent et à ceux qui en établissent le plan. On a plutôt besoin de mécaniciens instruits que d'esprits inventifs. L'inventeur a cédé la place à l'ingénieur.

Les principes essentiels qui régissent la construction des machines à vapeur, après avoir été successivement découverts du temps de Watt, sont devenus depuis lors familiers à tous les bons ingénieurs. Il en est résulté l'adoption de formes simples, solides et durables pour les machines et les chaudières, l'introduction de diverses sortes de soupapes et de mécanismes distributeurs permettant d'obtenir à volonté le degré de détente que l'on désire, l'emploi de régulateurs ingénieux, capables d'uniformiser la vitesse des machines, en fermant automatiquement la soupape d'admission au point le plus convenable, pour proportionner à chaque instant la force produite par l'expansion de la vapeur au travail qu'on lui demande.

Les avantages des hautes pressions et d'une détente prolongée furent reconnus dès les premières années du siècle actuel, et Watt, en combinant habilement les différentes parties principales de la machine à vapeur, lui donna à peu près la forme qu'elle possède aujourd'hui. La machine *Compound* elle-même, nous l'avons vu, fut inventée par les contemporains de Watt; et les seules modifications importantes survenues depuis ont porté sur les détails. L'introduction de la détente par déclanchement; la liaison du régulateur au mécanisme de détente, qui permet de régler celle-ci automatiquement; l'amélioration des proportions; l'adoption de plus hautes pressions et d'une expansion plus considérable; le perfectionnement de la machine marine par l'emploi du condenseur par surface, en outre des modifications précédentes; l'introduction

de l'enveloppe de vapeur, dès que l'élévation des pressions et l'accroissement de la détente en ont justifié l'usage : tels sont les changements survenus pendant les vingt-cinq dernières années. L'économie de vapeur due à la détente était devenue une notion vulgaire ; les mécaniciens et les inventeurs rivalisaient d'efforts pour obtenir un système de distribution permettant de réaliser les avantages immenses que semblaient promettre les propriétés des gaz résultant de la loi de Mariotte. Les influences perturbatrices de la condensation et de la revaporisation intérieures, des pertes de chaleur internes et externes, de l'imperfection du vide, de la distribution défectueuse de la vapeur et de la contre-pression, passaient inaperçues ou semblaient négligeables.

Il s'écoula donc bien des années, avant que les constructeurs de machines eussent acquis la conviction qu'aucun perfectionnement des organes de détente ne pouvait permettre d'atteindre, même approximativement, les résultats indiqués par la théorie.

Le fait ainsi constaté, que les avantages de la détente ont une limite promptement atteinte dans la pratique ordinaire, n'est entré que tout récemment dans le cercle des connaissances généralement admises par les constructeurs de machines; et, pendant la plus grande partie de la période où nous entrons maintenant, il s'établit une compétition active entre les constructeurs des systèmes rivaux de détente; chaque inventeur s'efforçait de produire quelque chose qui surpassât de beaucoup tous les dispositifs précédemment imaginés.

En Europe comme aux États-Unis, ces efforts pour « perfectionner » les types adoptés n'ont abouti le plus souvent qu'à leur nuire, et à augmenter les frais de premier établissement et d'entretien des machines, sans procurer aucune économie notable de vapeur.

CHAPITRE I

Machines fixes.

Les machines fixes avaient été, comme on l'a vu, appliquées par Watt et par Murdoch, son collaborateur et son élève, aux divers mécanismes employés dans l'industrie; avant même la mort de Watt, les rivaux du célèbre ingénieur, en Angleterre et au dehors, avaient réalisé des progrès considérables dans l'adaptation de la machine à vapeur à ces usages. Aux États-Unis, Olivier Evans avait introduit la machine fixe à haute pression sans condensation, d'où est sorti le type aujourd'hui de beaucoup le plus usité. Ces machines étaient d'abord assez grossièrement établies, mal proportionnées et construites sans précision; elles dépensaient sans profit une grande quantité de combustible. Peu à peu, les bons constructeurs arrivèrent à leur donner des formes élégantes, solides, des proportions heureuses; on y mit des matériaux d'excellente qualité, et on réduisit beaucoup les pertes de chaleur et de combustible.

Un des types les meilleurs et les plus satisfaisants pour les machines fixes de faible puissance est celui de la figure 90, qui représente une machine verticale à connexion directe, établie sur socle, disposition favorite de beaucoup d'ingénieurs.

Cette machine se compose de deux parties principales : le cylindre et le bâti. Ce dernier a la forme d'une colonne conique, ouverte sur les côtés, pour permettre le libre accès de tous les organes qu'elle contient. Les glissières et les paliers sont fondus d'un seul bloc avec la colonne, de sorte que leur fixité et leur ajustement sont invariablement

assurés ; les surfaces frottantes sont larges et faciles à lubrifier. Grâce à la position verticale de l'ensemble, il n'y a



Fig. 90. — Machine fixe verticale.

aucune tendance au déplacement latéral du cylindre ou du piston. Les secteurs qui forment la garniture s'ajustent d'eux-mêmes ; ils jouent librement, tout en restant étanches.

La manivelle est équilibrée; le bouton de manivelle, l'axe de la tête de bielle, la tige du piston, celle du tiroir, etc., sont en acier. Toutes les surfaces d'appui sont très étendues et ajustées avec le plus grand soin; les supports de coussinets sont en métal-Babbitt de la meilleure qualité.

Les petits numéros de ces machines, de 2 à 10 chevaux

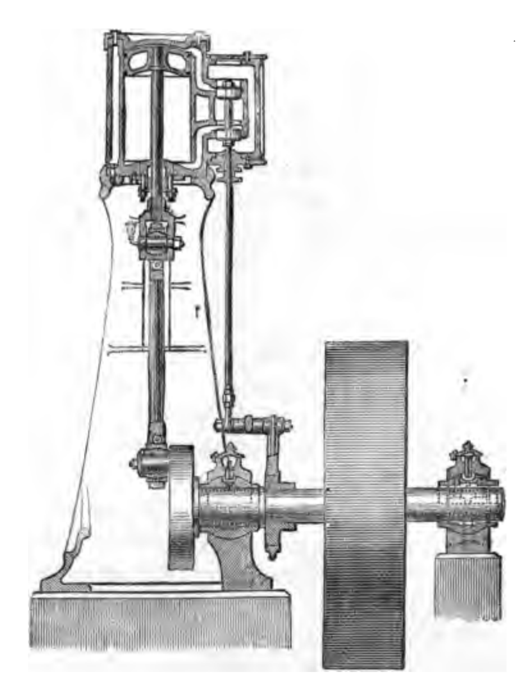


Fig. 91. — Machine à vapeur fixe verticale. — Coupe.

de force, ont deux paliers venus de fonte avec le bâti et formant ainsi support de part et d'autre du vilebrequin. Dans quelques usines, ces machines sont construites par séries et les organes sont travaillés par des machines spéciales, à la façon des pièces d'armes à feu ou de machines à coudre, ce qui assure la précision et l'uniformité des produits, et permet de remplacer promptement et à peu de frais une partie quelconque de la machine usée ou brisée

accidentellement. La figure précédente représente une coupe verticale d'une machine de même système (fig. 91).

Les machines avec paliers rigides ordinaires ont besoin d'être établies sur une fondation très solide et leurs pièces doivent être parfaitement alignées. Si, par le tassement des fondations ou pour toute autre cause, une déviation se produit, il en résulte l'échauffement, le cisaillement ou le martellement de divers organes. Pour remédier à cet inconvénient, les machines modernes sont souvent munies de coussinets à ajustage automatique. On leur donne ainsi une grande flexibilité et de la liberté dans les articulations. La coupe ci-dessus montre clairement comment s'obtient ce résultat. Le corps du coussinet est formé d'une sphère tournée et ajustée exactement dans une enveloppe présentant en creux la même forme, ce qui permet un léger déplacement angulaire dans tous les sens. La bielle est forgée d'une seule pièce, sans clavettes, brides ni goujons; elle présente à chaque extrémité une mortaise sphérique pour recevoir des coussinets de bronze de même forme, qui s'ajustent eux-mêmes exactement sur les tourillons, dans le plan de symétrie de la bielle. On rattrape l'usure au moyen de coins et de vis, disposés de façon qu'il ne se produise entre les différentes parties de la machine aucun jeu pouvant amener une rupture. La crosse du piston porte de chaque côté des coulisseaux ajustables et tournés de façon à s'emboîter exactement dans les glissières, qui font corps avec le bâti lui-même et sont évidées suivant une surface prolongeant exactement celle du cylindre; elle peut ainsi tourner librement sur son axe; et ce mouvement combiné avec la disposition des coussinets donne un ajustement automatique exact par rapport à l'arbre de couche. Le coussinet extérieur peut se déplacer d'un pouce ou même plus dans une direction quelconque sans gêner en rien la marche de la machine, les supports s'accommodant parfaitement d'eux-mêmes à toutes les positions que l'arbre peut prendre.

Les lumières sont proportionnées comme dans les locomotives. La glace est disposée pour l'emploi du tiroir simple

ordinaire ou de la soupape en D, si on le préfère; mais le tiroir cylindrique équilibré fonctionne également bien, que la pression de la vapeur soit de 10 ou de 100 livres; et en même temps il ouvre un double orifice d'admission et de sortie, ce qui facilite beaucoup l'entrée et l'échappement de la vapeur. On arrive ainsi à réduire la perte de pression à l'admission et la contre-pression à l'échappement, et l'on diminue le travail absorbé par la distribution et l'usure du tiroir.

Tel est le type de machine qu'on rencontre fréquemment aux États-Unis, mais plus rarement en Europe, et qui constitue un dispositif excellent. Ces machines verticales à connexion directe sont quelquefois établies sur de très grandes dimensions, et le plus souvent, dans ce cas, elles servent à actionner des laminoirs.

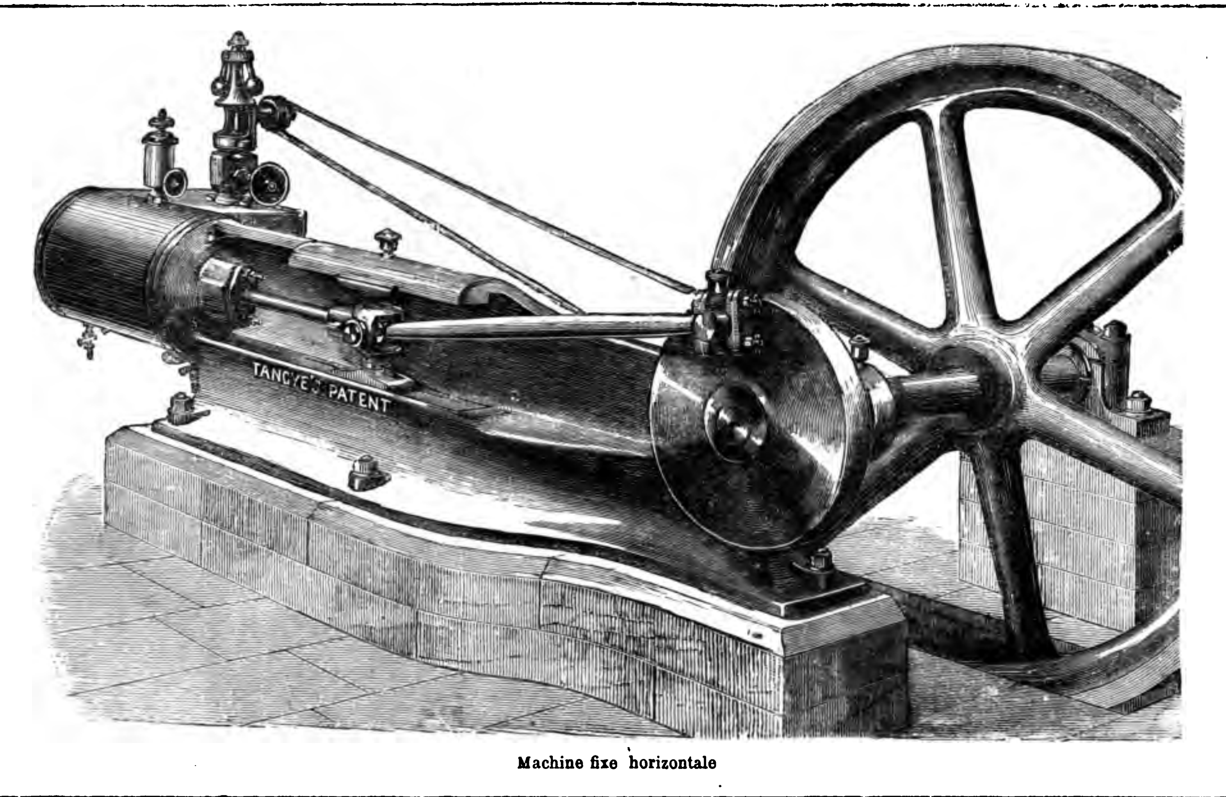
Lorsque l'on a besoin de beaucoup de force, on se sert généralement de la machine à connexion directe horizontale, avec détente plus ou moins prolongée, suivant la grandeur de la machine et le prix du combustible. On peut citer comme le type le plus simple de cette espèce la petite machine horizontale à tiroir, avec détente obtenue par un tiroir indépendant glissant sur le dos du tiroir principal, combinaison généralement connue des ingénieurs sous le nom de distribution Meyer. Ce type est excellent et fait un fort bon service quand la machine est bien proportionnée au travail qu'on lui demande. Il convient parfaitement à une détente de quatre à cinq fois le volume primitif. Ses inconvénients sont la difficulté qu'on éprouve à commander la détente variable par le régulateur, à cause de la résistance considérable qu'il devrait surmonter et du peu de souplesse de cette distribution. Les meilleures machines de cette sorte sont montées sur une solide plaque de fondation ; le cylindre et autres organes sont dessinés avec soin ; la distribution fonctionne avec douceur, le tiroir de détente se règle au moyen de deux vis à pas opposés, et l'uniformité du mouvement est assurée par la connexion du régulateur avec une soupape à gorge

La machine représentée dans le dessin (pl. X) est un

excellent spécimen de machine fixe anglaise. Elle est simple, solide et puissante. Le bâti, le fond antérieur du cylindre, les glissières et le palier forment un tout venu de fonte d'une seule pièce, suivant la méthode depuis longtemps employée par quelques constructeurs américains. Le cylindre s'assemble à l'extrémité de ce bâti, disposition que Corliss fut le premier à mettre en usage. Le bouton de manivelle est fixé sur un disque équilibré. L'appareil distributeur est simple, le régulateur très puissant et muni d'un dispositif de sûreté, pour parer aux accidents que pourrait entraîner la rupture de la courroie qui le commande. Une machine de ce genre, dont le cylindre a 10 pouces de diamètre et 20 pouces de course de piston, est donnée par les constructeurs pour environ 25 chevaux. La même, avec un cylindre de 30 pouces de diamètre, développerait une puissance de 225 à 250 chevaux. Dans l'exemple ici donné, tous les organes sont amenés à leurs dimensions exactes au moyen de gabarits, établis conformément aux formes adoptées par Whitworth.

Dans les machines américaines (fig. 92), deux supports sont habituellement placés, l'un sous le palier, l'autre sous le cylindre, pour soutenir le poids de l'ensemble et le rattacher aux fondations. Comme dans la machine verticale déjà décrite, on fait parfois usage d'un tiroir formé de deux pistons reliés par une tige et manœuvré par un excentrique ordinaire. Par une disposition très simple, ces pistons supportent toujours la même pression sur leurs faces opposées, ce qui empêche toute espèce de fuites; on prétend qu'ils fonctionnent aussi bien et sans plus de frottement lorsque la pression est de 150 livres que lorsqu'elle est de 10 livres seulement, et qu'ils n'ont besoin d'aucun ajustage. Il est plus fréquent toutefois de rencontrer, dans ces machines, le tiroir à trois lumières employé sur les locomotives, accompagné souvent d'un autre tiroir placé au-dessus pour produire la détente, dont l'étendue est réglée soit à la main, soit par le régulateur.

Grâce à leur simplicité, à leur petit volume, à leur solidité, les machines de la classe que nous venons de décrire



Machine fixe horizontale

portions de ses organes sont spécialement calculées pour obtenir une grande douceur de mouvement et une pression uniforme sur l'arbre et ses coussinets; conditions nécessaires dans une machine qui doit fonctionner à des vitesses telles, que l'inertie des organes animés d'un mouvement de va-et-vient constitue un élément d'une sérieuse importance dans le calcul de la distribution des efforts et de leur effet sur la dynamique de la machine.

Dans le système Allen [1], le cylindre et le bâti sont réunis comme dans la machine représentée plus haut; et le disque-manivelle, les coussinets de l'arbre et autres principaux détails ne présentent pas de différences essentielles. La distribution [2] comporte quatre distributeurs, un d'admission et un d'échappement à chaque extrémité, tous équilibrés et qu'un très petit effort suffit à faire fonctionner. Ces distributeurs sont manœuvrés par un excentrique calé sur l'arbre. Le point où la tige du distributeur se rattache à la barre d'excentrique est déterminé par le régulateur; de sorte que le degré de détente est ainsi proportionné au travail de la machine. La course du piston est généralement faible et ne dépasse pas le double diamètre du cylindre. Sa vitesse est très considérable; elle atteint en moyenne de 600 à 800 pieds par minute [3]. Cette grande vitesse du piston et la brièveté de sa course donnent une rotation extrêmement rapide. Il en résulte un mouvement d'une douceur exceptionnelle et la possibilité d'employer de petits volants. La course étant petite, le bâti est très ramassé et fort rigide; la machine est indépendante des fondations, qui peuvent être légères, même lorsque les résistances à surmonter sont considérables.

Les portées de l'arbre et toutes les surfaces cylindriques frottantes sont achevées par un rodage qui les rend complètement circulaires. L'arbre de couche et le bouton de manivelle sont trempés avant de subir cette opération. Les

1. Invention de MM. Charles T. Porter et John F. Allen.

2. Inventée par M. John F. Allen.

3. C'est-à-dire près de six cents fois la racine cubique de la longueur de course mesurée en pieds.

articulations de l'appareil distributeur sont constituées par des goujons tournant dans de solides viroles fixées aux extrémités des tiges, et qui sont trempés et rodés. Après des années de service, on n'a constaté aucune usure capable de produire un temps perdu dans les mouvements de la distribution.

Les grandes vitesses et les petites courses sont des éléments essentiels d'économie. On comprend parfaitement aujourd'hui que la vapeur est condensée par toutes les surfaces avec lesquelles elle vient en contact. Il est clair que pour réduire cette perte, il faut diminuer l'étendue des surfaces. Or, dans les machines à grande vitesse et à faible course, ces surfaces, pour un travail donné, présentent moins d'étendue que dans les machines ordinaires marchant à petite vitesse. Lorsqu'on veut obtenir une grande régularité de mouvement, on fait souvent la dépense de machines accouplées. Cet acouplement n'est pas nécessaire pour les machines à grande vitesse; une machine unique de cette espèce peut donner une plus grande uniformité de mouvement que les machines couplées à vitesse ordinaire. Le jeu des lumières et des soupapes, le poids des organes à mouvement alternatif, celui des volants et leurs dimensions, tout doit être expressément calculé en vue de la vitesse qu'on a choisie.

Sous le rapport de l'économie, les machines ci-dessus décrites ne le cèdent pas aux meilleures machines munies d'une détente par déclanchement, qui nous sont plus familières.

L'une d'elles, objet d'un rapport d'une commission de l'Institut américain présidée par le docteur Barnard, était sans condensation, avait un cylindre de 16 pouces de diamètre, de 30 pouces de course, faisait 125 révolutions par minute et développait une puissance de plus de 125 chevaux avec une pression de 75 livres par pouce carré dans la chaudière. Elle dépensait ainsi 25 livres trois quarts de vapeur par cheval nominal, et 2,87 livres de charbon, résultat extrêmement satisfaisant pour une machine d'aussi petites dimensions.

Le régulateur employé dans ces machines est connu sous le nom de régulateur Porter. Il est à la fois très puissant et très sensible, parce qu'il est surchargé, ce qui permet d'obtenir une grande vitesse de rotation, et parce que les bras se bifurquent et sont munis de deux tiges assez écartées pour exercer une force considérable dans les changements de vitesse, sans entraver le glissement de la douille au point d'altérer notablement la sensibilité de l'appareil. Ces machines peuvent en somme être considérées comme un bon type de la machine à grande vitesse moderne.

On a déjà fait de tels progrès dans le sens des grandes vitesses, que la détente par déclanchement est quelquefois inapplicable : le piston arriverait au bout de sa course avant que le distributeur ne ferme l'admission. On ne voit guère d'autres limites dans cette direction que celles imposées par la précision des mécanismes et l'habileté des constructeurs; on peut donc croire que la distribution par commande directe finira par supplanter la détente par déclanchement, quelle qu'en soit aujourd'hui la vogue.

Les machines munies de cette dernière distribution, appelée aussi détente par distributeur libre, n'en restent pas moins, pour le moment, les mieux connues et les plus usitées. La plus ancienne forme encore actuellement employée d'une distribution de ce système est la détente Sickels, que fit breveter vers 1841 le mécanicien américain de ce nom, et que construisit aussi Hogg de New-York, qui l'adopta pour la machine du steamer le *South America*. L'invention en est attribuée à l'un et à l'autre de ces ingénieurs. Elle fut présentée par son auteur sous une forme particulièrement convenable pour les machines à balancier, employées sur les fleuves de l'est des États-Unis; et elle fut adaptée aux machines fixes par MM. Thurston, Greene & Cie de Providence (Rhode Island), qui s'en servirent pendant plusieurs années avant qu'aucune autre forme de ce système ne devînt d'un usage général. La détente Sickels comportait des soupapes d'admission, habituellement indépendantes des soupapes

d'échappement; chacune était soulevée par un cliquet qui pouvait être, au moment voulu, déclanché par un coin, contre lequel il venait buter en se levant avec la soupape. Ce coin ou tel autre organe produisant le même effet pouvait être ajusté de façon que la soupape, rendue libre, retombât sur son siège au moment où le piston, poussé par la vapeur, atteignait le point où la détente devait commencer. L'admission se trouvant alors interrompue, le piston continuait sa course sous l'action de la vapeur détendue. La soupape habituellement employée était celle à double siège.

Sickels inventa plus tard ce qu'il appelait le « mouvement de balancier » *(beam motion)*, dont voici l'objet : avec la disposition primitive, le déclanchement ne peut se produire que pendant la première moitié de la course du piston, car, au delà, le mouvement de la tige du distributeur se renverse et la soupape se rapproche de son siège. Le *beam motion* permet la fermeture de l'admisssion en un point quelconque de la course. Un organe appelé « frappeur » *(wiper)*[1] est animé d'un mouvement de sens perpendiculaire à celui de la soupape et de son cliquet, et relié avec le balancier ou quelque autre partie de la machine, dont la marche suit celle du piston. Par cette combinaison, la soupape peut être déclanchée en un point quelconque de la course du piston ; un dispositif très simple permet au mécanicien de régler le *wiper* de façon qu'il vienne frapper le cliquet à tel instant du mouvement qu'il juge convenable.

Dans les machines fixes, la fermeture de l'admission fut plus tard commandée par le régulateur, disposé de manière à manœuvrer lui-même le mécanisme qui laissait retomber la soupape; cette combinaison constitue ce qu'on appelle quelquefois une détente automatique. L'emploi du régulateur pour régler le degré de détente avait été proposé avant le temps de Sickels. Une des plus anciennes dispositions de ce genre fut celle imaginée en

1. *Litt.* : qui donne un coup brusque, une tape, un soufflet.

1834 par Zachariah Allen, qui employait une détente indépendante de la distribution. Le premier qui relia ainsi le régulateur avec la détente par déclanchement fut George H. Corliss; il en fit un des traits caractéristiques du distributeur auquel il donna son nom en 1849. En 1855, N.-T. Greene imagina une distribution comportant le mouvement de balancier de Sickels, la commande de la détente par le régulateur et des tiroirs plats à toutes les lumières d'admission et d'échappement.

Une foule d'autres dispositifs ingénieux ont été inventés pour produire la détente; un grand nombre d'entre eux, lorsqu'ils sont bien construits, bien proportionnés, montés sur des machines bien établies, et convenablement manœuvrés, peuvent donner des résultats économiques à fort peu près équivalents à ceux fournis par les appareils ci-dessus décrits. Parmi les plus intéressants de ces récents systèmes, on peut citer celui de Babcock & Wilcox, dans lequel on fait usage d'un petit cylindre auxiliaire, dont le piston est chargé de manœuvrer l'obturateur d'admission au moment voulu. Sur cette machine est monté un très beau modèle de régulateur isochrone, pour régler la vitesse de la machine en déterminant le point de détente.

Dans la machine de Wright, le régulateur agit sur des cames qui manœuvrent les soupapes d'admission, de façon à les maintenir ouvertes un temps plus ou moins long.

Comme la légèreté et le petit volume ne sont pas, dans les machines fixes, des conditions aussi essentielles que dans les locomotives, les locomobiles et les machines marines, on en dispose les organes uniquement en vue de l'effet à produire, et on en détermine la forme suivant les circonstances locales. L'usage était autrefois d'employer les machines à condensation dans les usines, et pour toutes les installations fixes. Généralement en Europe, et dans une certaine mesure aux États-Unis, lorsque l'eau est facile à trouver, les machines à condensation et à pression modérée sont encore en usage. Mais ce type tend peu à peu à disparaître devant la machine à haute pression, sans condensation et permettant une détente considérable, dont le

degré est à chaque instant déterminé par le régulateur.

La machine la plus connue de ce genre est celle de Corliss, très répandue aux États-Unis, et que les constructeurs européens ont fort souvent reproduite. Elle est représentée ci-dessous (fig. 93).

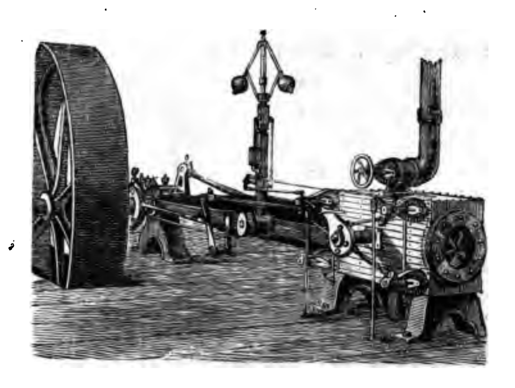


Fig. 93. — Machine Corliss.

Le cylindre, placé horizontalement, est solidement boulonné au bout du bâti, lequel est disposé de façon à transmettre le plus directement possible toute la fatigue au palier principal. Ce bâti porte les guides de la crosse du piston, qui sont tous les deux dans un même plan vertical. Les distributeurs sont au nombre de quatre : un d'admission et un d'échappement à chaque extrémité du cylindre. Les lumières sont ainsi très courtes, ce qui est une source assez notable d'économie. Les deux groupes de distributeurs sont manœuvrés par un excentrique agissant sur un disque ou plateau E (fig. 94), qui oscille autour d'un axe fixé sur le cylindre et perpendiculaire à sa longueur. De courtes tringles, partant de ce plateau, vont se rattacher aux différents distributeurs DD, FF, auxquelles elles impriment un mouvement varié d'une façon toute particulière. Très rapide au début, qu'il s'agisse de fermer ou d'ouvrir une lumière, il devient

très lent quand cette lumière est presque ouverte ou presque fermée. Cet effet est obtenu d'une façon fort ingénieuse en donnant aux chevilles du plateau une disposition telle, que la ligne parcourue par chacune d'elles devienne presque perpendiculaire à la direction des tringles des soupapes, quand on approche de la limite du mouvement. Les tringles qui rattachent le plateau aux bras des soupapes d'admission portent à leurs extré-

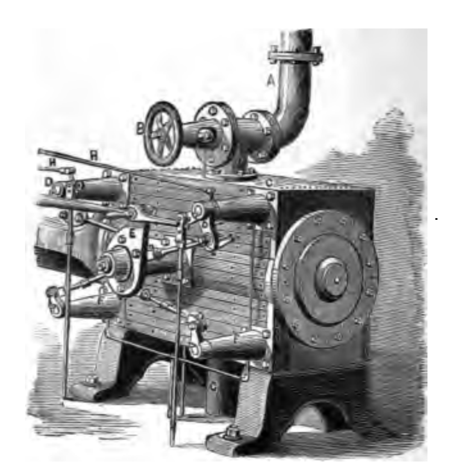


Fig. 94. — Distribution de la machine Corliss.

mités des cliquets qui se déclanchent, aussitôt que le mouvement oscillatoire du levier du distributeur les amène au contact d'une came dont la position est déterminée par le régulateur. Ce dispositif permet à la vapeur d'accompagner le piston pendant plus longtemps quand la machine ralentit sa marche, et tend ainsi à lui rendre la vitesse convenable. Si au contraire cette vitesse est dépassée, la soupape d'admission est dégagée plus tôt et la vapeur se détend davantage. Sitôt la soupape dégagée, elle est refermée par l'action d'un poids ou d'un ressort puissant. Pour empêcher la production d'un choc au moment où la soupape s'arrête, on fait usage d'un appareil, inventé à l'origine par F.-E. Sickels sous le nom de *dash-pot*, ou frein,

dont l'office est d'amortir ce choc. C'est un cylindre dans lequel un piston parfaitement ajusté vient pénétrer vers la fin de la course du distributeur. Ce piston est reçu par un matelas d'eau ou d'air contenu dans le cylindre. Sickels employait l'eau et son *dash-pot* était un cylindre vertical dans lequel un plongeur venait s'abattre sur une petite masse d'eau contenue dans le fond. Le *dash-pot* de Corliss est à air et on lui donne souvent une position horizontale.

Dans la machine de Greene (fig. 95), il y a quatre dis-

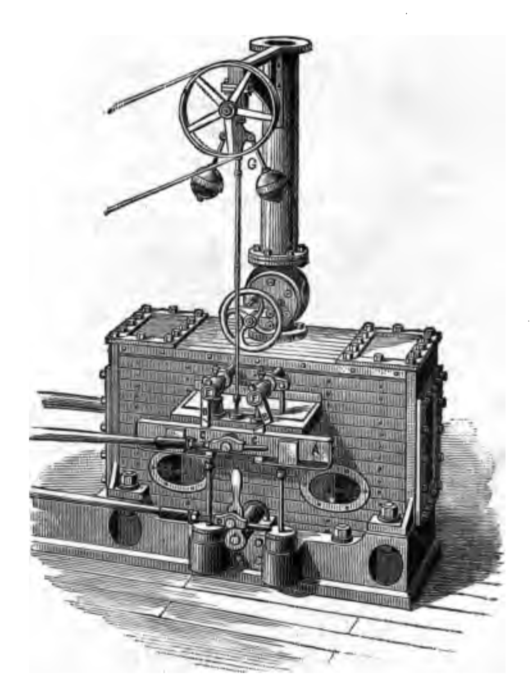


Fig. 95. — Machine de Greene.

tributeurs comme dans celle de Corliss. L'appareil de détente consiste en une barre A, qui reçoit de l'excentrique d'admission un mouvement parallèle à l'axe du cylindre et dont la marche coïncide presque avec celle du piston.

Sur cette barre sont des cames CC, portées par des ressorts et dont la hauteur est réglée par le régulateur G. Ces cames agissent sur les bras BB, placés à l'extrémité des arbres oscillants EE qui font mouvoir les distributeurs d'admission ; elles restent en contact avec eux plus ou moins longtemps, et maintiennent ainsi la soupape ouverte pendant une portion plus ou moins grande de la course du piston. Les distributeurs d'échappement sont manœuvrés par une bielle spéciale, mue elle-même par un excentrique, placé, comme c'est l'usage dans les machines de Corliss et dans beaucoup d'autres, à angle droit sur la manivelle.

Par suite de l'indépendance de l'excentrique d'admission, et de la simultanéité de mouvement du piston et du distributeur, on peut, dans cette machine, faire commencer la détente en un point quelconque de la course, presque jusqu'à la fin de celle-ci. La disposition ordinaire dans laquelle les distributeurs d'admission et d'échappement sont commandés par le même excentrique ne permet au contraire de faire varier le point de détente que dans les limites de la première moitié de la course du piston. Dans la machine de Corliss, si cette dernière combinaison a été conservée, c'est en partie pour avoir le moyen de fermer les distributeurs par action directe, au cas où, par quelque accident, la fermeture ne pourrait être effectuée par le poids ou le ressort habituellement chargé de cette opération.

Le tiroir d'admission de la machine de Greene, tel que l'auteur de ce livre l'a conçu, est représentée dans la figure 96, couvrant la lumière D : GH tiroir du cylindre AB, mû par la tige JJ, reliée à l'arbre oscillant M par le bras LK. La ligne KI prolongée couperait la face inférieure du tiroir en son point milieu, au-dessous de G.

Les traits caractéristiques de la machine fixe américaine sont donc : haute pression, pas de condensation, détente par déclanchement commandée par le régulateur, grande vitesse de piston, construction légère et solide tout à la fois. La pression la plus habituelle pour ce genre de machines

est de 75 à 80 livres par pouce carré. Mais les pressions de 100 livres ne sont pas rares, et on peut regarder ce dernier chiffre comme un « maximum moyen », correspondant à ce qu'était la pression de 60 livres au com-

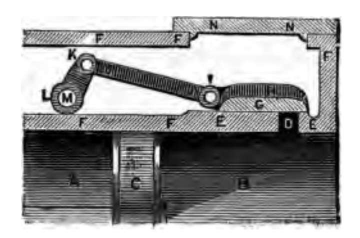


Fig. 96. — Distributeur de Thurston pour la machine de Greene.

mencement de la période que nous étudions, c'est-à-dire vers 1850.

Quelques constructeurs ont pourtant adopté des pressions beaucoup plus considérables, et plusieurs ingénieurs en ont même essayé d'énormes. Dès 1823, Jacob Perkins[1] commençait à expérimenter la vapeur à des tensions très élevées. Comme nous l'avons déjà dit, les pressions les plus habituelles du temps de Watt ne dépassaient que de quelques livres, 5 ou 7, la pression atmosphérique. Evans, Trevithick et Stevens avaient employé la vapeur à des pressions de 50 à 75 livres par pouce carré, et déjà aux États-Unis, sur les fleuves de l'Ouest et ailleurs, on était allé jusqu'à 100 et 150 livres; aussi les explosions devenaient-elles d'une fréquence alarmante.

L'appareil expérimental de Perkins consistait en une chaudière de cuivre, de 1 pied cube environ de capacité et dont les parois avaient 3 pouces d'épaisseur. Elle était fermée en bas et en haut, et munie de cinq petits tubes partant de la partie supérieure. On la plaça sur un fourneau, où un tirage forcé produisait une haute température. Des sou-

1. Perkins naquit le 9 juillet 1766 à Newburyport (Massachusetts), et mourut à Londres le 3 juillet 1849. Il se rendit en Angleterre à l'âge de cinquante-deux ans, pour y proposer ses inventions.

papes de sûreté, chargées respectivement à 425 et 550 livres par pouce carré, furent placées sur deux des tubes de prise de vapeur.

Perkins employa la vapeur produite dans ces conditions à faire mouvoir une petite machine dont le piston avait 2 pouces de diamètre et 1 pied de course. La puissance en était estimée à 10 chevaux [1].

En 1827, Perkins avait atteint dans une machine à simple effet et à un seul cylindre, des pressions de plus de 800 livres par pouce carré. Lorsqu'il dépassa 200 livres, il éprouva beaucoup de peine à lubrifier convenablement les organes, parce que toutes les huiles brûlaient et se décomposaient aux hautes températures qui accompagnent ces grandes pressions. Il finit enfin par triompher de cet obstacle qui semblait insurmontable, en employant, pour la confection des parties frottantes, un alliage particulier qui n'exigeait l'emploi d'aucun lubrifiant et devenait même, après quelque usage, d'un si beau poli qu'il donnait moins de frottement que les autres substances lubrifiées. A ces pressions élevées, Perkins semble n'avoir pas rencontré d'autres difficultés sérieuses. Il condensait la vapeur à sa sortie et la renvoyait à la chaudière, mais n'essayait pas de produire le vide dans son condenseur et, par conséquent, n'avait pas besoin de pompe à air. La détente commençait au 1/8 de la course.

La même année, Perkins fit une machine *Compound* du

1. C'est à propos de cette machine que Stuart écrivait en 1824 : « D'après les progrès rapides accomplis par la machine à vapeur pendant ces quarante dernières années, et qui tendent à en faire un moteur d'un usage universel, d'après l'expérience qu'a dû procurer cette extension même de son usage, nous sommes convaincus que toute invention qui en diminuera le poids, sans en amoindrir la puissance, la rendra plus apte à venir en aide aux grands travailleurs de ce monde, le cultivateur et le paysan, pour qui elle fait encore si peu de chose. A présent on lui fait seulement parfois moudre le grain. Quel honneur pour celui qui saura se servir de sa force pour labourer, semer, herser et moissonner ! » Les progrès réalisés par la machine à vapeur pendant ces quarante années-là ne nous paraissent plus aussi étonnants aujourd'hui. Néanmoins les pensées exprimées dans ces lignes n'ont rien perdu de leur vérité.

système de Woolf, et adopta une pression de 1,400 livres avec une détente portant l'expansion jusqu'à huit fois le volume primitif. Pour un autre moteur encore, destiné à un bâtiment à vapeur, Perkins adopta, ou proposa d'adopter une pression de 2,000 livres avec interruption de l'admission au sixième de la course dans des machines à simple effet, dont le cylindre avait 6 pouces de diamètre et le piston 20 pouces de course. Mais la vapeur ne conservait pas dans le cylindre la pression qu'elle avait dans la chaudière, et la puissance obtenue ne fut évaluée qu'à 30 chevaux[1].

Après avoir décrit les travaux de Perkins sur les perfectionnements de la machine et l'artillerie à vapeur, Stuart ajoute : « ..... Nul autre mécanicien de nos jours n'a fait plus que lui pour éclairer une branche obscure de la physique, par une série d'expériences dangereuses, coûteuses et difficiles ; il n'est personne dont les travaux aient plus mérité d'être encouragés et qui, pourtant, ait moins reçu d'encouragements. Même dans leur état actuel, ces expériences ouvrent un champ nouveau aux recherches physiques, et ces études mécaniques conduisent à adopter des règles nouvelles dans les proportions, la construction et la forme des organes des machines à vapeur. »

La vie de Perkins ne fit pas exception à la loi générale, qui refuse à presque tous les inventeurs la récompense que mériteraient les bienfaits dont ils comblent l'humanité.

Quelques années plus tard, un autre ingénieur réussit également à faire travailler la vapeur à des pressions beaucoup plus élevées que celles en usage aujourd'hui. C'était le docteur allemand Ernest Alban, constructeur de machines distingué, de Plau en Mecklenbourg, grand admirateur d'Olivier Evans, et qui alla fort loin dans la voie ouverte par ce hardi pionnier. En 1843, il décrivit un système de construction des chaudières et des machines,

1. *Galloway and Hebert, On the steam-engine.* Londres, 1836.

qui lui permettait d'employer la vapeur à des pressions à peu près égales à celles dont Jacob Perkins, successeur américain d'Evans, s'était servi dans ses expériences. Le traité d'Alban fut traduit et imprimé en Angleterre[1] quatre ans plus tard.

Alban fit usage, dans certains cas, de vapeur à 1,000 livres de pression (par pouce carré, soit environ 65 atmosphères). Ses chaudières étaient semblables comme forme générale à celle qu'avait fait breveter Stevens en 1805; mais les tubes étaient horizontaux au lieu d'être placés verticalement. Avec 1 livre de charbon, il vaporisait de 8 à 10 livres d'eau, à 600 ou 800 livres de pression. Il dit n'avoir pas éprouvé, dans ses expériences, la difficulté qui, un moment, embarrassa Perkins : la décomposition des substances employées pour lubrifier le cylindre et le piston. Il constata même que le lubrifiage était moins nécessaire à ces hautes pressions que dans les conditions ordinaires. Le plus souvent, Alban faisait détendre la vapeur à peu près autant qu'Evans, en partant d'une pression de 150 livres et coupant l'admission au tiers de la course. Il adopta pour le piston une vitesse de 300 pieds par minute, beaucoup plus grande que celle alors en usage, qui ne dépassait pas 200 pieds. Habituellement ses machines étaient oscillantes, et rarement à condensation. Son distributeur était le tiroir de locomotive[2]. La course était courte, afin d'avoir solidité, faible volume, bon marché et grande rapidité de rotation. Mais Alban ne semble pas avoir compris les principes qui régissent la forme et les proportions de la machine à détente, ni la nécessité d'adopter une expansion prolongée pour une marche économique, quand on se sert de vapeur à haute pression; il est probable qu'il ne se rendait pas non plus compte des avantages d'une longue course, qui réduit les pertes dues aux « espaces morts », et les

1. *The High-Pressure Steam Engine*, etc., by Dr Ernest Alban. Translated by William Pole, F. R. A. S. Londres, 1847.

2. Inventé par Joseph Maudsley, de Londres, 1827.

inconvénients provenant de l'échauffement des coussinets, et permet de donner de grandes vitesses au piston. Il ne paraît pas être jamais allé, sous ce rapport, assez loin pour constater que le cylindre oscillant cesse d'être praticable avec des vitesses encore parfaitement admissibles avec le cylindre fixe.

Alban assure qu'une de ses plus petites machines, dont le cylindre avait 4 pouces 1/2 de diamètre et le piston 1 pied de course, avec une vitesse de 110 à 160 pieds par minute seulement, développait une force de 4 chevaux, en brûlant 5,3 livres de charbon par heure et par cheval. C'est là un bon résultat pour une si petite puissance et pour une machine fonctionnant avec une aussi faible vitesse de piston. Une autre machine de 30 chevaux, qui marchait aussi très lentement, ne consommait que 4,1 livres de charbon par cheval et par heure.

Toutefois Perkins et Alban, comme leurs prédécesseurs Evans, Stevens et Trevithick, étaient des ingénieurs fort en avance sur leur temps. La pratique générale, jusqu'au commencement de la période moderne de raffinement, ne s'était approchée que lentement des résultats que nous venons de décrire. On n'arriva que progressivement à l'adoption des hautes pressions, des grandes vitesses de piston et d'une détente considérable. Plus tard les causes des pertes de chaleur furent découvertes, et l'emploi des chemises de vapeur et des enveloppes non conductrices devint de plus en plus général, à mesure que les constructeurs acquéraient plus d'expérience. La machine *Compound* fut adoptée de temps à autre; et chaque essai nouveau de la haute pression et de la grande détente rapprochait du succès final.

Enfin l'on finit par reconnaître l'utilité de chacun de ces procédés pour une marche économique, et par en analyser les effets. Il ne resta plus dès lors, comme dernier pas dans cette voie du progrès, qu'à combiner toutes ces conditions dans une machine avec chemise de vapeur, bien protégée par des enveloppes non conductrices, employant la vapeur à haute pression, avec une détente consi-

dérable et une grande vitesse de piston. C'est ce que font maintenant les meilleurs constructeurs.

Un des plus beaux exemples de ce type de machines, c'est celui qu'ont adopté les fils de Jacob Perkins, qui continuèrent l'œuvre de leur père après sa mort. Leurs machines sont à simple effet, et le petit cylindre, ou cylindre de haute pression, est placé au-dessus du grand, où la vapeur agit à pression basse. Les distributeurs sont manœuvrés par des axes tournants, et l'on évite ainsi les pertes de chaleur et le brûlement des garnitures. Les *stuffing-boxes* sont placés à l'extrémité de longues gaines verticales entourant les tiges des distributeurs; l'eau de condensation qui se rassemble dans ces gaines protège très efficacement les garnitures contre l'effet des températures élevées de la vapeur. Les anneaux du piston sont confectionnés avec un alliage spécial qui n'a pas besoin d'être lubrifié.

La vapeur est ordinairement employée à la pression de 240 livres ; on la produit dans des chaudières composées de petits tubes de 3 pouces de diamètre et de 3/8 de pouce d'épaisseur, qui sont éprouvés à une pression de 2,500 livres par pouce carré. La soupape de sûreté est généralement chargée à 400 livres. La chaudière est alimentée au moyen d'eau distillée obtenue principalement par la condensation de la vapeur d'échappement; le surplus est fourni par un appareil distillatoire spécial. Dans ces conditions, on ne brûle plus que 1 livre 1/2 de charbon par cheval et par heure.

La machine d'épuisement en usage aujourd'hui a passé par une série de transformations analogues à celles qu'a éprouvées la machine motrice pour usines. La machine de Cornouailles est encore employée parfois pour fournir l'eau à quelques villes, et on la conserve aussi pour les mines très profondes. Elle diffère très peu de ce qu'elle était au temps de Watt, sauf dans les proportions de ses différentes parties et dans quelques détails des formes. On emploie des pressions qu'on n'avait jamais atteintes pendant la période précédente; et, par un ajustement soigneux des

soupapes, qui sont bien mieux établies et mieux proportionnées, on est parvenu à donner à la machine un peu plus de vitesse et à en obtenir beaucoup plus de travail. Elle n'en reste pas moins un appareil énorme, coûteux et incommode, exigeant des fondations dispendieuses, des soins tout spéciaux, une adresse et une expérience exceptionnelles pour la bien conduire. Aussi tend-elle peu à peu à disparaître. La figure 97 en est une coupe, indiquant la disposition que lui donnent aujourd'hui les bons constructeurs.

En la comparant avec la machine de Watt, d'un siècle plus ancienne, on peut apprécier tout de suite de quelles modifications est susceptible une machine, même après qu'elle est devenue complète, c'est-à-dire pourvue de tous ses organes essentiels.

Dans cette figure, A est le cylindre auquel la vapeur arrive de la chaudière par la lumière M. Cette vapeur pénètre d'abord au-dessus du piston, le fait descendre rapidement, et soulève ainsi la maîtresse-tige E. Bientôt après l'admission est coupée par la fermeture soudaine de la soupape M; la course du piston s'achève sous l'action de la vapeur qui se détend, aidée par l'inertie des lourds organes en mouvement. Le plus souvent, quand la machine travaille à l'épuisement de mines profondes, le poids et l'inertie nécessaires sont assurés par la longueur même des lourdes tiges de pompe. Si ce poids n'est pas suffisant, on ajoute le complément voulu; dans le cas contraire, on l'équilibre en partie. Quand la course est terminée, la « soupape d'équilibre » s'ouvre, et, la vapeur se répandant à la fois sur les deux faces du piston, les pressions s'annulent; la maîtresse-tige descend alors, refoulant l'eau et soulevant le piston à vapeur. L'absence de manivelle, ou de tout autre organe pouvant limiter exactement la longueur de course, oblige à proportionner avec précision la quantité de vapeur admise au poids à soulever. Si la course venait à s'allonger de manière à faire craindre un choc du piston contre le fond du cylindre, l'étendue en serait limitée par des poutres élastiques faisant office de tampons. La distribution est manœu-

vrée par une poutrelle JK, comme dans la machine de Watt. Le mouvement est réglé par une « cataracte », sorte de régulateur hydraulique, formé d'un piston plongeur pressant sur un matelas d'eau et d'un réservoir. Ce piston est soulevé par la machine, puis retombe automatiquement d'une chute plus ou moins rapide, suivant les dimensions de l'orifice de sortie de l'eau, qu'on peut régler à la main.

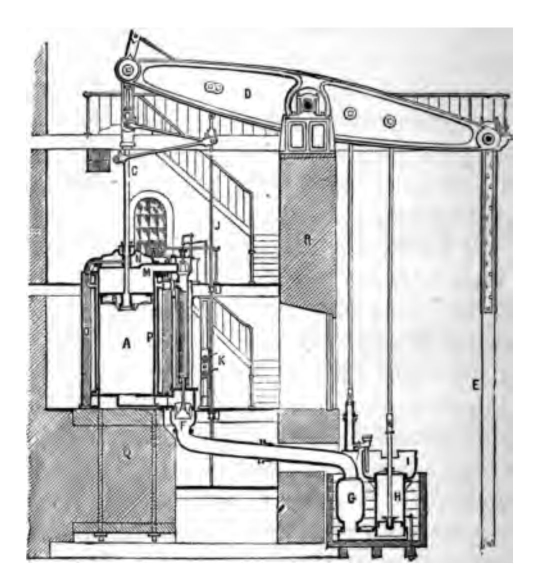


Fig. 97. — Machine à épuisement de Cornouailles. 1878. — Coupe.

Quand il atteint le fond du corps de pompe, il repousse un cliquet et permet ainsi à un poids d'agir sur la soupape d'admission pour l'ouvrir; la machine donne alors un coup de piston. Quand l'orifice de la cataracte est presque fermé, la machine s'arrête pendant le temps assez considérable que le plongeur emploie pour descendre, et les coups de piston se succèdent à de longs intervalles. Si l'ouverture est plus grande, la cataracte agit plus rapidement et le mouvement s'accélère.

Jusqu'à ces derniers temps, cette machine a été consi-

dérée comme l'appareil d'épuisement le plus économique; elle est encore généralement employée dans les mines et dans tous les cas d'ailleurs où l'on peut utiliser, pour équilibrer l'action de la vapeur, le poids même des tiges de pompe; l'inertie de ces lourdes masses entretient le mouvement après que la vapeur, en se détendant, a perdu une partie de sa pression primitive.

Dans cette machine, un balancier élégant et solide D a remplacé la poutre grossière des anciens temps; il est supporté par un fort pilier en maçonnerie R; F est la soupape d'échappement par où la vapeur se rend au condenseur G, à côté duquel on aperçoit la pompe à air H et la bâche à eau chaude I. Le cylindre est enveloppé d'une chemise de vapeur P, et protégé contre les pertes dues au rayonnement par un mur de briques O; le tout repose sur de puissantes fondations Q.

On rencontre encore assez fréquemment la machine de Cornouailles de Bull. Ces pompes de Cornouailles donnent en Angleterre un rendement moyen d'environ 45,000,000 de livres élevées à un pied de hauteur pour 100 livres de charbon. Quelquefois même on a obtenu plus du double.

Une forme beaucoup plus simple de machine d'épuisement sans volant est la « pompe à vapeur à action directe », aujourd'hui très répandue. On l'emploie généralement comme pompe alimentaire, comme pompe foulante ou pompe à incendie, et dans le cas où le débit de l'eau à refouler n'est pas très grand, mais où la pression au refoulement est forte. Le cylindre à vapeur AR et la pompe BQ (fig. 98) sont placés dans le prolongement l'un de l'autre, les deux pistons ayant une tige commune D. Ces deux cylindres sont reliés par un solide châssis N, et reposent sur deux supports munis d'oreilles, qui servent à boulonner la pompe sur un plancher ou sur la fondation.

La distribution est fort ingénieuse. Dans la position de la figure, les pistons se meuvent vers la gauche. Quand ils arrivent vers l'extrémité de leur course, le piston à vapeur touche une cheville ou autre organe analogue; il fait ainsi

mouvoir une petite soupape auxiliaire I qui découvre une lumière E et introduit la vapeur derrière le grand piston ou, comme dans la figure, laisse échapper la vapeur qui presse sur le piston auxiliaire F; la pression à l'intérieur de la boîte à vapeur pousse alors ce piston vers la gauche

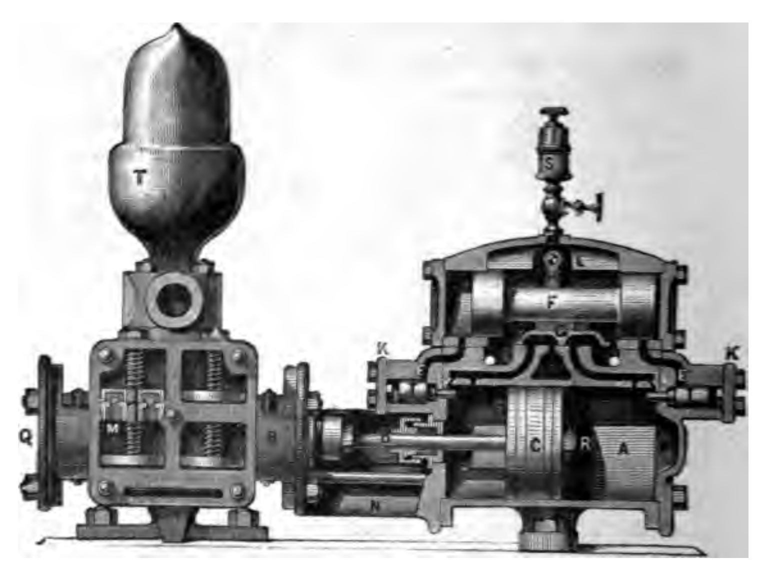


Fig. 98. — Pompe à vapeur à action directe.

et fait mouvoir le tiroir G, auquel il est relié. La vapeur pénètre ainsi sur la face gauche du grand piston et sort du côté de sa face droite A. De cette façon la machine manœuvre sa distribution; et le dispositif est tel qu'il n'y a jamais à craindre de temps d'arrêt dans la marche à la fin de la course du piston, malgré l'absence de manivelle et de volant, ou d'un mécanisme indépendant comme la cataracte de la machine de Cornouailles. Il existe une très grande variété de pompes de cette espèce, qui diffèrent toutes dans les détails, mais présentent toutes aussi le trait caractéristique de posséder une distribution et un piston auxiliaires, les deux systèmes de pistons et de distribution se commandant réciproquement.

Quelquefois on donne à ces pompes des dimensions considérables, et on s'en sert pour élever l'eau dans des conditions où jadis on considérait la machine de Cor-

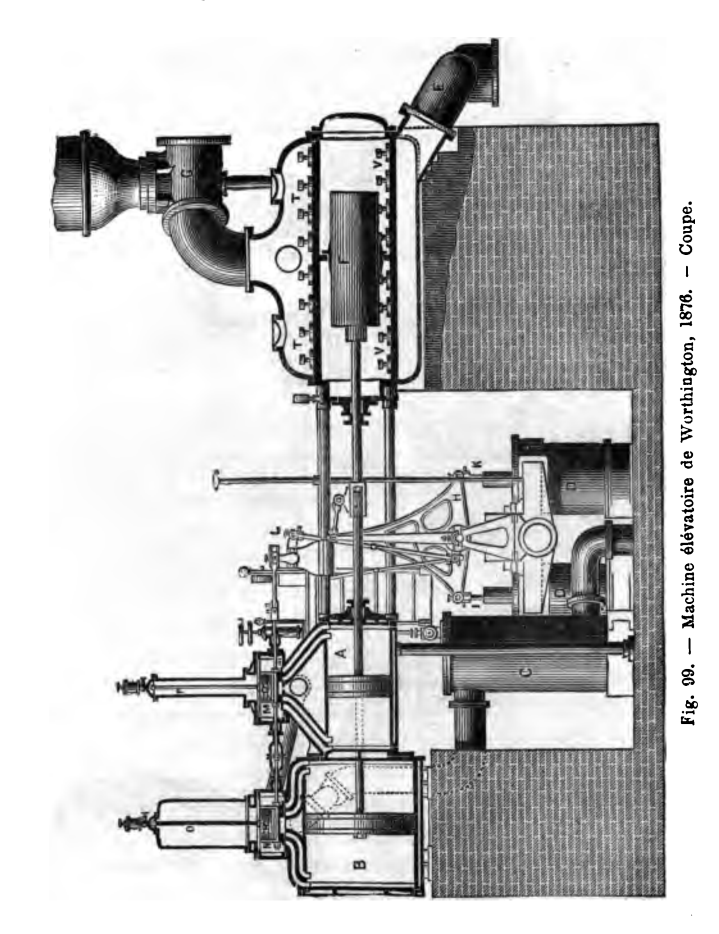


Fig. 99. — Machine élévatoire de Worthington, 1876. — Coupe.

nouailles comme seule applicable. Le dessin ci-dessus (fig. 99) représente une machine élévatoire de ce genre, établie pour le service des eaux d'une ville. Elle est à action directe et à deux cylindres. Les cylindres A et B sont placés sur le prolongement l'un de l'autre; ils font marcher une

pompe F et actionnent leurs propres pompes à air DD au moyen d'un balancier LH, relié aux pistons par des

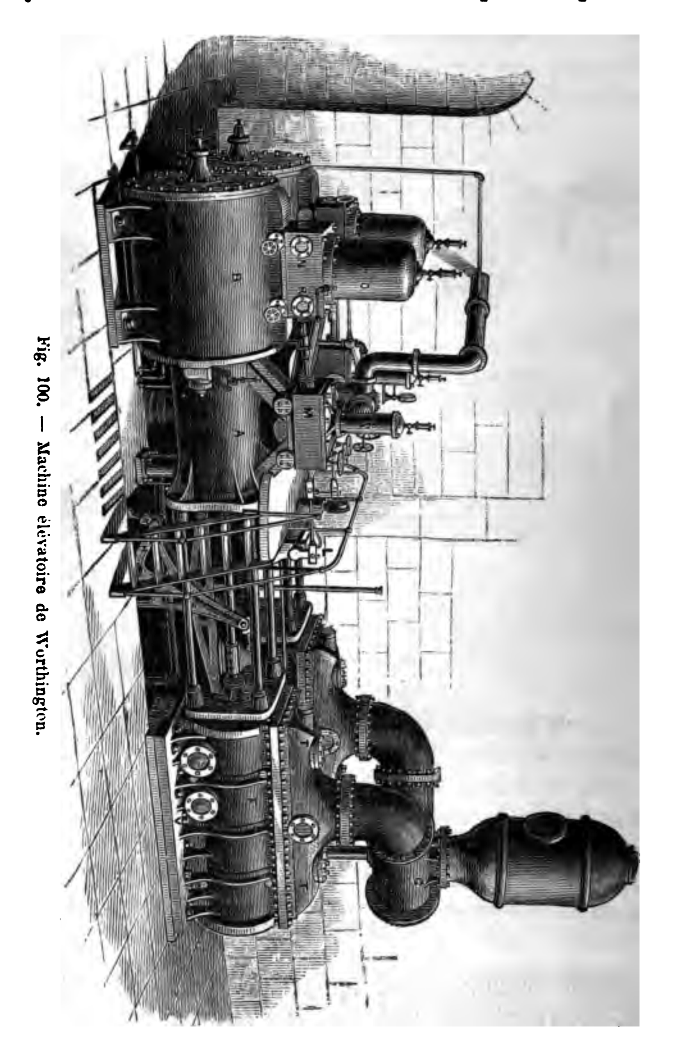


Fig. 100. — Machine élévatoire de Worthington.

tiges IK. La vapeur sortant du petit cylindre A se détend dans le grand B, et va de là au condenseur. Les tiroirs NM

sont mus par l'appareil L, manœuvré lui-même par la tige du piston d'une deuxième paire de cylindres semblables, placés à côté des premiers. Ces tiroirs sont déchargés par les compensateurs RQ, suspendus à des tiges OP, qui leur permettent d'en suivre le mouvement. Le tiroir de chaque machine étant commandé par la tige du piston de l'autre machine, on voit qu'elles fonctionnent alternativement, l'une donnant un coup de piston pendant que l'autre est immobile, puis s'arrêtant elle-même un instant, tandis que le piston de l'autre accomplit sa course.

L'eau arrive à la pompe par le tuyau d'aspiration E, y pénètre par les soupapes VV et sort par les soupapes de refoulement TT, pour se rendre aux réservoirs par la conduite G, au-dessus de laquelle on voit une chambre à air qui aide à maintenir une pression uniforme. Cette machine fonctionne sans bruit et avec une grande douceur ; elle est solide, peu coûteuse et son rendement est excellent.

Aujourd'hui les machines élévatoires à balancier sont presque toujours pourvues d'une manivelle et d'un volant, et très souvent sont du type *compound*. Le dessin ci-dessous en représente une de cette espèce (fig. 101).

A et B sont les cylindres, reliés par des bielles et un parallélogramme CD au grand balancier de fonte EF. A l'extrémité opposée de celui-ci, la bielle G fait tourner une manivelle H avec un volant LM, qui, réglant le mouvement de la machine et la longueur de la course du piston, empêche les accidents qui pourraient arriver si ce piston frappait les fonds du cylindre. Le balancier est supporté par d'élégantes colonnettes en fer qui, avec l'ensemble des cylindres, de la pompe et du volant, reposent sur une solide fondation en maçonnerie. La maîtresse-tige I actionne une pompe à double effet J, et la résistance au refoulement est régularisée par une chambre à air K, dans laquelle le niveau du liquide monte ou descend quand les pressions tendent à varier. Un arbre N, qui reçoit du volant un mouvement de rotation, porte des cames O, P, qui font mouvoir les tiges qu'on voit immédiatement au-dessus et les soupapes que ces tiges commandent. Entre les cylindres

et les colonnes qui soutiennent le balancier se trouve un puits, dans lequel sont placés le condenseur et la pompe à air. La vapeur est employée à une pression de 60 à 80 livres, et se détend de six à dix fois son volume initial.

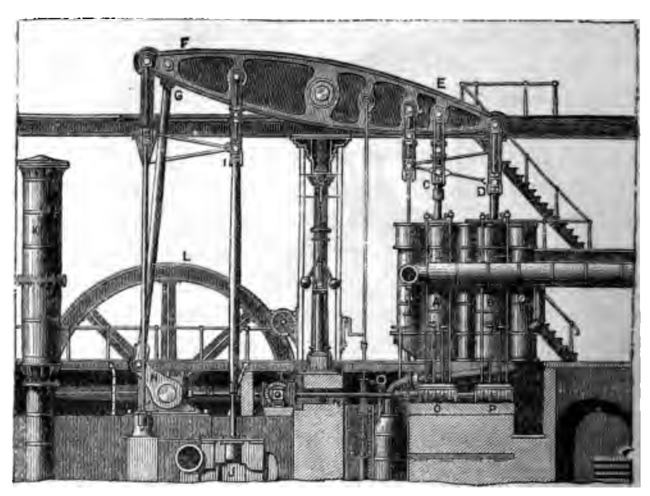


Fig. 101. — Machine d'épuisement à double cylindre. 1878.

Un modèle plus récent de machine élévatoire à balancier et à deux cylindres est celui qu'a imaginé et établi E.-D. Leavitt jeune, pour le service des eaux de Lynn (Massachusetts), et que représentent la planche XI et la figure 102. Les deux cylindres sont inclinés, rapprochés à leurs bases, et attaquent les deux bouts du balancier. A leur sommet une soupape est placée à chaque extrémité du tube à vapeur qui les réunit. En bas, au contraire, une seule soupape sert à la fois pour l'échappement du cylindre à haute pression et l'admission dans celui de basse pression. Les pistons se meuvent en sens opposés et la vapeur sortant du cylindre à haute pression se rend directement dans l'extrémité de l'autre qui est la plus voisine. La pompe, du système « Thames Ditton », foulante et élévatoire, s'emplit pendant l'ascension du piston et refoule ce volume d'eau moitié pendant la descente du piston, moitié pendant

l'ascension suivante. Le rendement de cette machine, mesuré par une commission d'ingénieurs, a été évalué à 103,923,215 livres-pieds pour 100 livres de charbon brûlé. Or le rendement d'une machine assez bonne est habituellement de 60 à 70 millions.

Dans la machine représentée, les cylindres ont respecti-

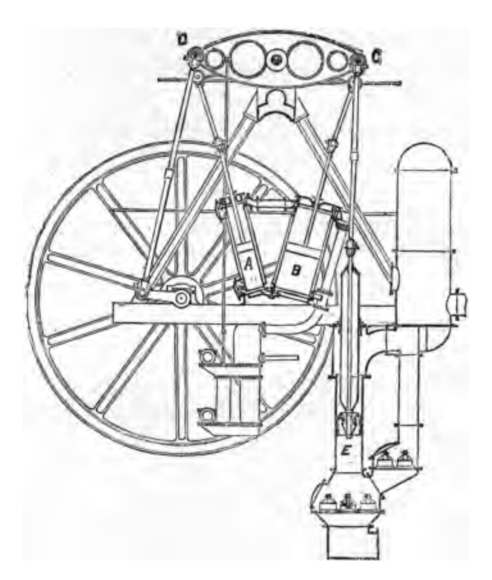


Fig. 102. — Machine élévatoire de Leavitt.

vement 17 et demi et 36 pouces de diamètre; la course des pistons est de 7 pieds. La capacité de la pompe est d'environ 195 gallons, et elle rend 96 pour 100. La pression de la vapeur est de 75 livres par pouce carré, en sus de la pression atmosphérique, et la détente de 1 à 10. Les chaudières sont à simples tubes horizontaux; par livre de charbon, elles vaporisent 8,58 livres d'eau, prise à la température de 98° Fahrenheit.

Chaudières. — La vapeur fournie aux diverses sortes de machines fixes que nous venons de décrire est produite dans des chaudières de formes extrêmement variées. Le

type employé dans chaque cas particulier est déterminé en tenant compte : 1° de l'augmentation de prix d'achat qu'entraîne l'emploi des hautes pressions, auxquelles on a recours pour économiser le combustible; 2° de la plus ou moins grande nécessité de se mettre à l'abri des explosions; 3° de la nature de l'eau d'alimentation employée; 4° des facilités locales d'entretien et même du caractère des ouvriers entre les mains desquels l'appareil doit être placé.

Comme on l'a vu, les modifications qui ont signalé la croissance et le développement progressif de la machine à vapeur ont été accompagnées d'autres modifications tout aussi remarquables dans la disposition des chaudières. Au début, la vapeur agissait dans le récipient même où elle était produite. Plus tard, le générateur fut séparé de la machine et organisé spécialement en vue des fonctions particulières qu'il avait à remplir; puis sa forme subit une série de transformations sous l'action des causes indiquées ci-dessus.

Lorsqu'on commença à appliquer couramment la vapeur et que les hautes pressions devinrent nécessaires, les formes données aux chaudières étaient à peu près sphériques, ellipsoïdales ou cylindriques. Ainsi les chaudières de de Caus (1615) et du marquis de Worcester (1663) étaient sphériques ou cylindriques; celles de Savery (1698) étaient cylindriques ou ellipsoïdales. Quand l'invention de la machine Newcomen eut ramené l'emploi des basses pressions, les chaudières reprirent des formes irrégulières, jusqu'à ce qu'au commencement du siècle actuel on se retrouvât obligé d'en augmenter la solidité. Le métal dont on se servit d'abord fut souvent le cuivre; maintenant c'est habituellement le fer forgé et quelquefois l'acier.

On peut diviser les systèmes actuels de chaudières en trois classes : les chaudières simples, à foyer intérieur et tubulaires. La chaudière cylindrique simple ou ordinaire est le seul représentant du premier type qui soit d'un usage général. Elle est exactement cylindrique, avec fonds plats ou hémisphériques, et le plus souvent munie d'un dôme dans lequel se fait la prise de vapeur. Cette augmentation

du réservoir de vapeur permet aux particules de liquide, que le fluide tient toujours en suspension, de s'en séparer plus ou moins complètement.

Les chaudières à foyer intérieur sont fréquemment cylindriques, et contiennent un ou plusieurs carneaux, également cylindriques, qui traversent de bout en bout au-dessous du niveau de l'eau et sont parcourus par les gaz du foyer; ils donnent une surface de chauffe plus considérable que les chaudières simples. Le diamètre de ces chaudières est habituellement de 30 à 48 pouces, et leur longueur, d'un pied environ par chaque pouce de diamètre. Il en est toutefois qui ont 100 pieds de long et même davantage. La chaudière est en tôle, d'un quart à trois huitièmes de pouce d'épaisseur, avec des têtes hémisphériques, ou plates mais solidement étayées. Le tout est enveloppé d'un briquetage. Ces chaudières sont employées quand le combustible n'est pas très coûteux, ou bien quand les frais de réparation seraient considérables, ou encore quand l'eau d'alimentation est impure.

On donne le nom de chaudières de Cornouailles à des chaudières cylindriques avec un foyer intérieur, placé dans un carneau qui les traverse longitudinalement, parce que l'on croit généralement que c'est dans le Cornouailles qu'elles ont été employées pour la première fois. Il est probable pourtant qu'elles furent imaginées d'abord aux États-Unis, avant 1786, par Olivier Evans, qui dès cette époque en faisait usage. Le diamètre du carneau est en général les 0,5 ou 0,6 de celui de la chaudière.

Les chaudières à deux carneaux longitudinaux sont dites chaudières du Lancashire. Ce type est dû également à Olivier Evans. Le diamètre des carneaux est alors le tiers de celui de la chaudière. On emploie souvent encore plusieurs carneaux d'un petit diamètre, et quand il est nécessaire d'augmenter davantage la surface de chauffe, on les remplace par des tubes de 1 pouce un quart à 4 ou 5 pouces de diamètre.

Les carneaux sont ordinairement construits en feuilles de tôle réunies par des rivets, par la même méthode

que l'enveloppe extérieure de la chaudière. On les fabrique quelquefois par soudure, en Angleterre, mais rarement, ou même jamais, aux États-Unis. Les tubes sont au contraire toujours obtenus par l'enroulement d'une feuille de métal, soudée ensuite à recouvrement. De petits tubes furent employés pour la première fois aux États-Unis vers 1785.

Dans les chaudières de locomobiles, de locomotives et



Fig. 103. — Chaudière verticale de Babcock et Wilcox.

de machines marines, le foyer doit être disposé à l'intérieur même de l'appareil, et non plus, comme dans les chaudières fixes ci-dessus décrites, dans un fourneau extérieur en briques. La flamme et les gaz ne se rendent plus alors du foyer ou de la boîte à feu à la cheminée par des conduits en briques, comme c'est souvent le cas

dans le système précédent. Ils sont toujours amenés à la boîte à fumée à travers des carneaux ou des tubes. Ces chaudières sont aussi quelquefois employées avec les machines fixes. La figure 103 donne la coupe d'une chaudière de cette espèce, telle qu'on la représente ordinairement dans les dessins d'ateliers.

La circulation de l'eau est assurée dans ces chaudières au moyen d'écrans qu'on voit dans le dessin, et qui forcent l'eau à se mouvoir comme l'indiquent les flèches. Les tubes sont fréquemment en laiton ou en cuivre, pour assurer la prompte transmission de la chaleur à l'eau et permettre de réduire la surface de chauffe et les dimensions de la chaudière. La boîte à vapeur est aussi vaste que possible pour atténuer les entraînements d'eau. Ce type, inventé par Nathan Read, de Salem (Massachusetts), en 1791, et breveté en avril de cette même année, fut le premier échantillon des chaudières tubulaires.

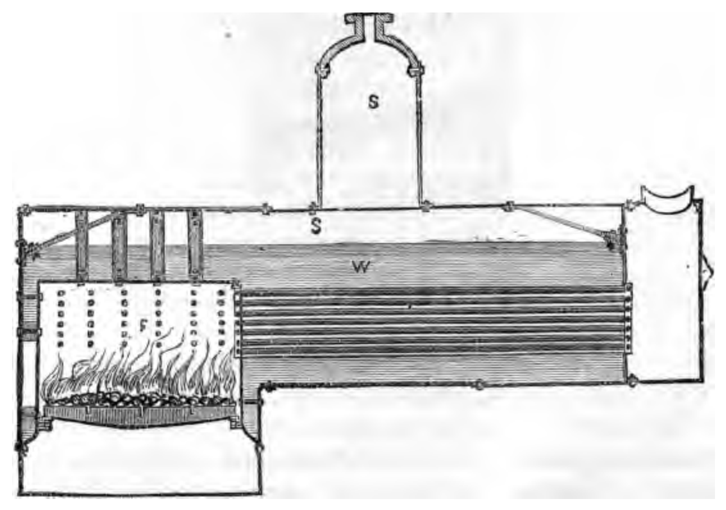


Fig. 104. — Chaudière locomotive pour machine fixe.

La chaudière de locomotive (fig. 104) est caractérisée, comme la précédente, par une boîte à feu métallique, qui

est disposée à une de ses extrémités, et par une série de tubes, par lesquels les gaz se rendent directement à la boîte à fumée. Solidité, petit volume, grande puissance de production de vapeur, économie de combustible, prix modéré et agencement facile avec les organes moteurs de la machine, tels sont les avantages que procure ce dispositif, employé fréquemment aussi pour les machines fixes et locomobiles. Il a été inventé en France par M. Séguin, en Angleterre par Booth, et George Stephenson en a fait usage à peu près vers la même époque (1828 ou 1829).

L'effet utile d'une chaudière dépendant de l'étendue de la surface de chauffe rapportée à l'unité de poids de combustible brûlé dans un temps donné, ou ordinairement du rapport des surfaces de grille et de chauffe, on emploie quelquefois des expédients particuliers, ayant pour objet d'accroître la surface de chauffe, sans changer la forme de la chaudière et sans en augmenter proportionnellement le prix de revient.

Une de ces méthodes consiste dans l'emploi des tubes

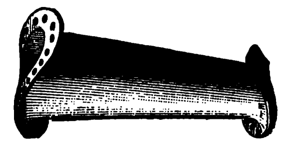


Fig. 105.

coniques de Galloway (fig. 105). L'usage en est très fréquent en Angleterre, mais aux États-Unis on ne les rencontre que fort rarement. La chaudière de Cornouailles, à laquelle ils sont ordinairement adaptés, se compose d'un gros corps cylindrique de 6 pieds ou même plus de diamètre, contenant un carneau de dimensions moitié moindres, ou quelquefois deux, dont chacune a pour diamètre le tiers de celui de la chaudière elle-même. Dans ces générateurs, le rapport de la surface de chauffe à la surface de grille est très faible, et les gros carneaux sont exposés à s'écraser. Pour faire disparaître ces inconvénients, MM. Gal-

loway ont introduit dans les carneaux des tubes d'étai de forme conique, disposés verticalement ou inclinés, le gros bout en haut. La surface de chauffe est ainsi beaucoup augmentée et les chances d'écrasement fort réduites. Les mêmes résultats sont obtenus par un autre dispositif, dû encore à Galloway, et que l'on trouve parfois combiné avec le précédent dans une seule et même chaudière. Les parois du carneau portent des « poches » qui font saillie à l'intérieur.

Un autre système est celui de l'ingénieur américain Miller, qui entoure, avec des tubes remplis d'eau, le foyer des chaudières cylindriques et autres. Les « économiseurs de combustible » de Green et autres consistent en des groupes de tubes analogues, disposés dans les carneaux entre le générateur et la cheminée.

L'usage des chaudières « à compartiments » se généralise peu à peu, en même temps que celui des hautes pressions, à cause de la plus grande garantie qu'elles offrent contre les explosions désastreuses. Le premier exemple pratique d'un générateur de cette espèce fut probablement la chaudière du colonel John Stevens de Hoboken (New-Jersey). Le docteur Alban qui, quarante ans plus tard, essaya de faire adopter par le public ce type de générateur, et en construisit un grand nombre d'exemplaires, ne réussit pas. Leur introduction, comme celle de tous les changements radicaux dans les machines, a été lente; et c'est seulement dans ces derniers temps que leur fabrication est devenue une branche importante d'industrie.

Une commission de l'Institut américain, dont l'auteur était président, examina, en 1871, plusieurs chaudières de ce type et du système ordinaire et les éprouva avec beaucoup de soin. Dans leur rapport, les commissaires exprimèrent « la confiance que l'usage de ces chaudières contribuerait beaucoup à faire disparaître ce sentiment universel d'inquiétude, qui rend inadmissible dans bien des cas la présence des machines à vapeur. On arrive graduellement à écarter les défauts inhérents à ce système de construc-

tion : difficultés d'inspecter la chaudière, d'en régler l'action, etc., et la commission est convaincue que le temps est proche où l'usage en deviendra général, à l'exclusion des formes de générateur plus anciennes et plus dangereuses. »

Les résultats économiques fournis par ces chaudières, pour un même rapport de la surface de chauffe à la surface de grille, sont égaux à ceux que donnent les autres types. En fait, ce rapport est d'ordinaire quelque peu plus grand dans les chaudières à compartiments, et l'économie de combustible qu'elles procurent surpasse souvent celle fournie par les autres systèmes. Leur principal défaut est la petite quantité de vapeur et d'eau qu'elles peuvent contenir, ce qui rend extrêmement difficile d'obtenir des pressions constantes. Il faut, autant que possible, régler automatiquement l'alimentation et le tirage, et n'injecter dans la chaudière que de l'eau déjà chauffée à la plus haute température qu'on peut obtenir. Le bon fonctionnement dépend ici, plus que dans les autres cas, de l'habileté du chauffeur; et, pour l'obtenir, la vigilance et l'adresse lui sont également indispensables.

On a imaginé beaucoup de variétés de ces chaudières. Walter Hancock en construisit une pour ses voitures à vapeur, composées de plusieurs compartiments plats, constitués eux-mêmes par des tôles entretoisées; vers le même temps (1828), sir Goldworthy Gurney établissait pour le même objet des chaudières consistant en un réservoir de vapeur et un réservoir d'eau superposés, communiquant par des tubes repliés en forme de triangle et exposés à la chaleur des gaz du foyer. Jacob Perkins fit beaucoup d'expériences sur l'emploi des très hautes pressions, et en 1831 il fit breveter une chaudière de ce genre, dont les surfaces les plus voisines du foyer étaient des tubes en fer, qui servaient en même témps de barres pour la grille. La plus grande partie de l'eau et de la vapeur étaient contenues dans une chambre relativement vaste, dont les parois étaient solidement main-

tenues par un grand nombre de boulons. Pour les pressions extrêmement élevées, on se servait de chaudières composées uniquement de tubes. Le docteur Ernest Alban décrivit celle dont nous avons déjà parlé, son fonctionnement et sa construction, assurant qu'il l'avait essayée avec des pressions atteignant 1,000 livres par pouce carré.

La chaudière de Harrison, depuis longtemps employée aux États-Unis, se compose de plusieurs compartiments dont chacun est formé d'une série de boules creuses en fonte, communiquant entre elles par des étranglements obtenus au moulage, et qui sont réunies par application de leurs faces soigneusement ajustées. De longs boulons, allant d'un bout à l'autre de chaque rangée, relient toutes ces sphères ensemble (fig. 106).

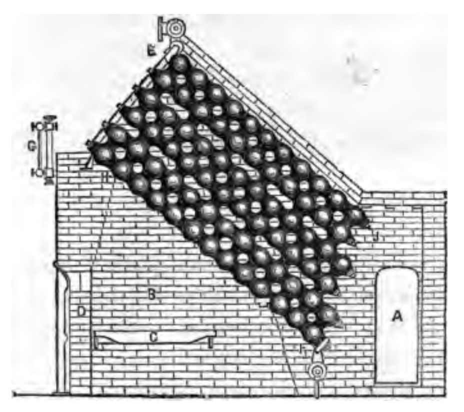


Fig. 106. — Chaudière à compartiments de Harrison.

La figure 107 donne un exemple d'un autre type très usité; c'est une chaudière en partie à compartiments, qui consiste en une série de tubes en fer forgé inclinés, réunis par des têtes en T, formant des conduits verticaux à chaque extrémité. Les joints sont rodés et usés à la meule si exactement, qu'une pression même de 500 livres au pouce carré est insuffisante à produire des fuites. On n'emploie

aucune garniture. Le foyer se trouve à l'extrémité antérieure des tubes, qui est aussi la plus élevée; et les gaz montant entre ces tubes se rendent dans une chambre de combustion sous le réservoir d'eau et de vapeur; de là ils redescendent, puis remontent encore une fois entre les tubes et se rendent à la cheminée. La prise de vapeur se fait au sommet du tambour, près de l'extrême arrière de la

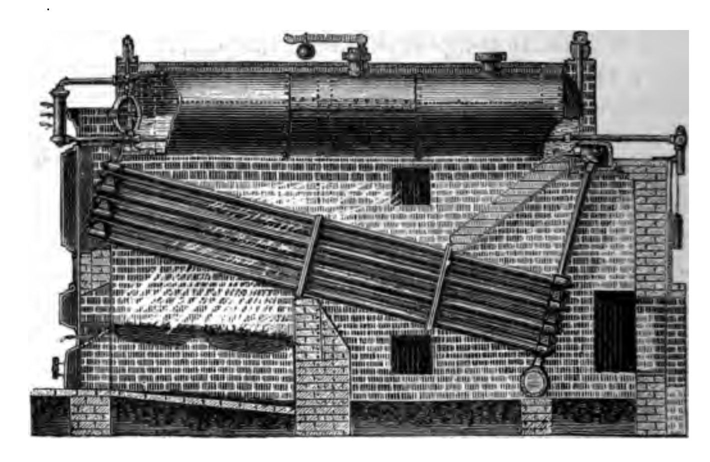


Fig. 107. — Chaudière à compartiments de Babcock et Wilcox.

chaudière. La rapidité de la circulation empêche dans une certaine mesure la formation de dépôts ou d'incrustations, en balayant les impuretés pour les déposer dans le tambour, d'où elles sont facilement évacuées. Cette circulation rapide a aussi l'avantage, comme l'a démontré le professeur Trowbridge, de faciliter la transmission de la chaleur, aussi bien en renouvelant constamment le liquide en contact avec les parois qu'en empêchant les incrustations.

On a essayé d'adapter des chaudières à compartiments aux machines marines; mais peu de progrès ont été faits dans cette direction. La chaudière à compartiments de Root, de construction américaine, qui est très usitée aux États-Unis et en Europe, a été aussi essayée à bord des

navires (fig. 108). La surface de chauffe consiste tout entière en tubes réunis par une série de chapeaux d'une forme

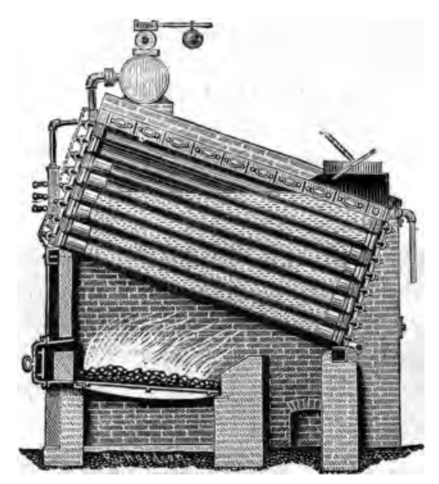


Fig. 108. — Chaudière à compartiments de Root.

particulière; les joints sont rendus étanches au moyen de lames de caoutchouc.

CHAPITRE II

LOCOMOBILES ET LOCOMOTIVES

On voit souvent aujourd'hui une machine et une chaudière de petites dimensions réunies de manière à former un tout facilement transportable. Lorsque, comme dans la figure 109, la chaudière et la machine reposent simplement sur une semelle servant de support commun, le système est dit habituellement « mi-fixe ». Ces petites machines ont quelques avantages évidents. Fixées sur la même base, la chaudière et la machine ainsi combinées sont faciles à transporter, occupent peu de place, et on peut en très peu de temps monter le système sur quatre roues, ce qui le rend particulièrement propre aux besoins de l'agriculture.

Le spécimen représenté ici diffère par ses dispositions de ceux qu'on voit habituellement dans le commerce. La machine n'est pas fixée à la chaudière; elle n'est donc pas affectée par la dilatation de celle-ci, et ses supports ne sont pas exposés à être échauffés par conductibilité ou par la chaleur qui monte de la chaudière. Le volant se trouve à la partie inférieure, disposition qui assure la stabilité aux grandes vitesses nécessaires pour une marche économique. Les chaudières sont du système tubulaire vertical, avec boîte à feu intérieure; elles sont destinées à fonctionner à une pression de 150 livres par pouce carré. Elles sont munies d'écrans et d'un tuyau de circulation, pour éviter l'entraînement de l'eau, et aussi d'un bouchon fusible pour empêcher le ciel du foyer de brûler, quand le niveau de l'eau vient à baisser.

On voit (fig. 109) un autre exemple de cette forme de machine, montrant le dispositif adopté pour les petites dimensions. On remarquera que le cylindre est placé dans la partie supérieure même de la chaudière, laquelle est verticale. De cette façon, la vapeur est plus chaude et



Fig. 109. — Machine demi-portative. 1878.

plus sèche; et l'on évite les pertes par condensation, qui sont sérieuses, même avec les courts tuyaux, quand la machine est isolée de la chaudière.

La machine ci-dessous (fig. 110) est donnée pour faire 10 chevaux; et les constructeurs doivent toujours garantir que leurs machines sont capables de fournir le travail porté aux tarifs.

Le cylindre a 7 pouces sur 7, et l'arbre est placé directement au-dessus. Il porte trois excentriques; l'un ma-

nœuvre la pompe, un autre le tiroir de distribution et le troisième le tiroir de détente. La poulie motrice a 20 pouces de diamètre et le volant 30. La chaudière contient 15 tubes de 1 1/4 pouce : elle est pourvue d'un réchauffeur à sa base. Éprouvée à 200 livres de pression, elle est destinée à en supporter 100 seulement; encore n'en faut-il pas autant

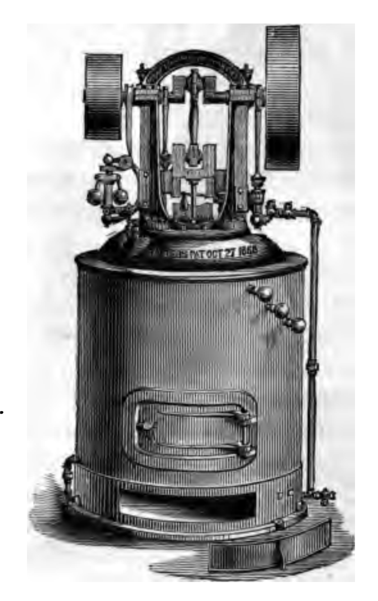


Fig. 110. — Machine demi-portative. 1878.

pour développer toute la puissance de la machine. Celle-ci est surtout remarquable par la petitesse tout à fait exceptionnelle de son volume. On peut l'installer dans un espace de 5 pieds carrés sur 8 de haut. Son poids, pour une force de 10 chevaux, n'est que de 1,540 livres; et, avec la chaudière, le poids de tout l'ensemble emballé et prêt à embarquer ne dépasse pas 4,890 livres. Toutes les parties du mécanisme sont ajustées et fonctionnent avec la précision d'une batterie de fusil, car chaque pièce est soigneusement faite au gabarit.

Les machines locomobiles sont destinées à être trans-

portées facilement d'un point à un autre. La machine est alors habituellement fixée à la chaudière, et la pompe alimentaire à la machine. Tout l'ensemble est monté sur des roues et traîné d'ordinaire par des chevaux, mais quelquefois par la machine elle-même, qu'on peut à volonté mettre en connexion avec les roues d'arrière. Les constructeurs anglais excellent généralement dans ce genre de constructions, quoique sans doute les meilleures machines américaines vaillent tout autant comme disposition, exécution et qualité des matériaux.

Les derniers produits des constructeurs anglais les plus connus ont donné des résultats économiques dont les ingénieurs ont été surpris. Les expositions annuelles de la Société royale d'agriculture ont témoigné d'autant d'habileté dans la conduite des machines que de perfection dans leurs dispositions et leur exécution. Quelques petites locomobiles ont fait preuve de qualités économiques supérieures à celles des plus puissantes machines marines, sauf celles du type *compound*, et même elles peuvent lutter de très près avec ces dernières. Les causes de cette économie si remarquable sont faciles à comprendre, quand on examine attentivement ces machines et la façon dont elles sont conduites lors des épreuves. Elles sont d'ordinaire très soigneusement établies. Les cylindres sont bien proportionnés à la force qu'on veut obtenir et les pistons marchent à grande vitesse. Le distributeur consiste généralement en un simple tiroir auquel est superposé un tiroir de détente. Ce dernier, mû par un excentrique indépendant, permet de faire varier considérablement le degré d'expansion. Cette méthode de régler la détente donne d'excellents résultats, — presque aussi bons que la distribution par déclanchement dans les circonstances habituelles, où l'expansion atteint environ quatre fois le volume primitif. Le régulateur est habituellement relié à une soupape à gorge, placée dans la conduite d'amenée; cette disposition n'est pas la meilleure possible quand l'effort demandé varie fréquemment, mais elle n'entraîne pas de pertes sérieuses de force dans les concours, où la résistance est donnée par un frein

de Prony et où la machine doit développer à très peu près son maximum de puissance. Celles de ces machines qui donnent les meilleurs résultats ont leur cylindre pourvu d'une chemise de vapeur, condition essentielle du maximum d'économie, et travaillent à haute pression et détente considérable. Les chaudières sont très solidement construites, et, comme toutes les parties chauffées de la machine, soigneusement recouvertes d'enveloppes non conductrices, parfaitement jointives. Tous les organes sont bien proportionnés, les tiges et les cadres très forts et bien reliés ensemble, les surfaces frottantes très étendues. Les bielles sont longues, manœuvrent aisément, et chaque partie de la machine est capable de fonctionner sans effort et avec le moins de frottement possible.

Dans les épreuves des concours, on choisit pour conduire les machines les mécaniciens les plus habiles et les plus expérimentés. La différence dans le produit de la même machine, confiée à des mains différentes, peut varier de 10 à 15 pour 100. C'est un fait constaté par expérience, même dans des cas où les mécaniciens rivaux étaient considérés comme d'une habileté exceptionnelle. Pendant la marche de la machine, on entretient le feu avec un soin extrême ; on l'alimente à intervalles courts et réguliers, on veille à ce que la couche de combustible soit d'une épaisseur uniforme et que la surface en soit toujours parfaitement nette. Les parties latérales et les angles du foyer sont surtout l'objet d'une attention spéciale. On ne laisse les portes ouvertes que le moins longtemps possible ; on utilise rigoureusement jusqu'au dernier pouce de la surface de grille, et on arrive ainsi à obtenir de chaque livre de charbon le maximum de chaleur qu'elle peut donner, en faisant agir celle-ci là précisément où elle est nécessaire. L'alimentation de la chaudière est aussi continue et aussi régulière que possible. Quelquefois le mécanicien se tient en permanence à côté de sa machine, mettant au feu le charbon par poignées, et versant l'eau dans le réchauffeur au moyen d'une simple tasse. Car en pareil cas on ne manque jamais d'employer des réchauffeurs. L'orifice de

sortie de la vapeur n'est jamais plus resserré qu'il n'est absolument nécessaire pour le tirage. Le frein est soigneusement surveillé, de peur qu'un lubrifiage irrégulier n'amène une variation dans la vitesse, par suite d'un changement dans la résistance. Celle-ci est du reste portée au maximum de ce que la machine peut surmonter avec économie. Toutes les conditions favorables sont donc autant que possible réunies, et conservées aussi invariables qu'une attention extrême de la part du mécanicien permet de le faire.

Enfin généralement ces épreuves ne durent que de trois à cinq heures, et se terminent par conséquent avant qu'il ne soit nécessaire de nettoyer les grilles. Le tableau suivant fait connaître les résultats obtenus au concours de machines de juillet 1870 à l'Exposition agricole d'Oxford :

NOM ET DOMICILE DU CONSTRUCTEUR.	CYLINDRES.		Longueur de course (en pouces).	FORCE EN CHEVAUX.		Indice de détente.	Révolutions par minute.	Livres de charbon par cheval et par heure.
	Nombre.	Diamètre (en pouces).		Nominale.	Dynamométrique.			
Clayton, Shuttleworth et Cie, à Lincoln.......	1	7	12	4	4,42	....	121,65	3,73
Brown et May, à Devizes.	1	7 3/16	12	4	4,19	11,48	125,65	4,44
Compagnie des forges de Reading, à Reading..	1	5 3/4	14	4	4,16	....	145,7	4,65

Ces machines étaient horizontales et adaptées à des chaudières de locomotive.

Dans une Exposition semblable tenue à Bury en 1867, on avait même obtenu des résultats encore meilleurs, avec des machines de dimensions et de types semblables, comme on le voit ci-dessous :

NOM ET DOMICILE DU CONSTRUCTEUR.	CYLINDRES.		Longueur de course (en pouces).	FORCE EN CHEVAUX.		Indice de détente.	Révolutions par minute.	Livres de charbon par cheval et par heure.
	Nombre.	Diamètre (en pouces)		Nominale.	Dynamométrique.			
Clayton, Shuttleworth et Cie, à Lincoln.......	1	10	20	10	11,00	3,10	71,5	4,13
Compagnie des forges de Reading, à Reading..	1	8 5/8	20	10	10,43	1,4	109,4	4,22

Dans toutes ces machines, on faisait usage de chemises de vapeur; l'eau d'alimentation était fortement et uniformément chauffée par la vapeur sortant du cylindre; le charbon était choisi, cassé et mis au feu avec le plus grand soin. La vitesse de marche, la pression et la quantité d'eau d'alimentation étaient réglées très minutieusement et la plus grande aisance était laissée au jeu de tous les organes. Les mécaniciens étaient habituellement des « jockeys [1] » fort habiles.

Le dessin suivant (fig. 111) représente une locomobile d'un des plus anciens et des plus expérimentés constructeurs des États-Unis.

La surface de chauffe des machines de ce genre est moindre que dans les machines fixes, mais beaucoup plus grande que dans les locomotives, et varie de 10 à 20 pieds carrés par cheval. Les chaudières sont très solidement établies, pour leur permettre de résister à la fatigue que leur fait éprouver la machine, qui y est directement fixée, fatigue qu'on évalue du dixième au cinquième de celle causée par la pression de la vapeur. Quelquefois même on donne à la chaudière une force double de celle habituellement adoptée

1. Cette qualification qu'on leur donne ici provient de l'analogie qu'on établit entre leur rôle dans ces concours et celui des jockeys aux courses de chevaux. *(N. du tr.)*

pour les machines fixes de mêmes dimensions. On voit que dans cet exemple la machine est installée directement au-

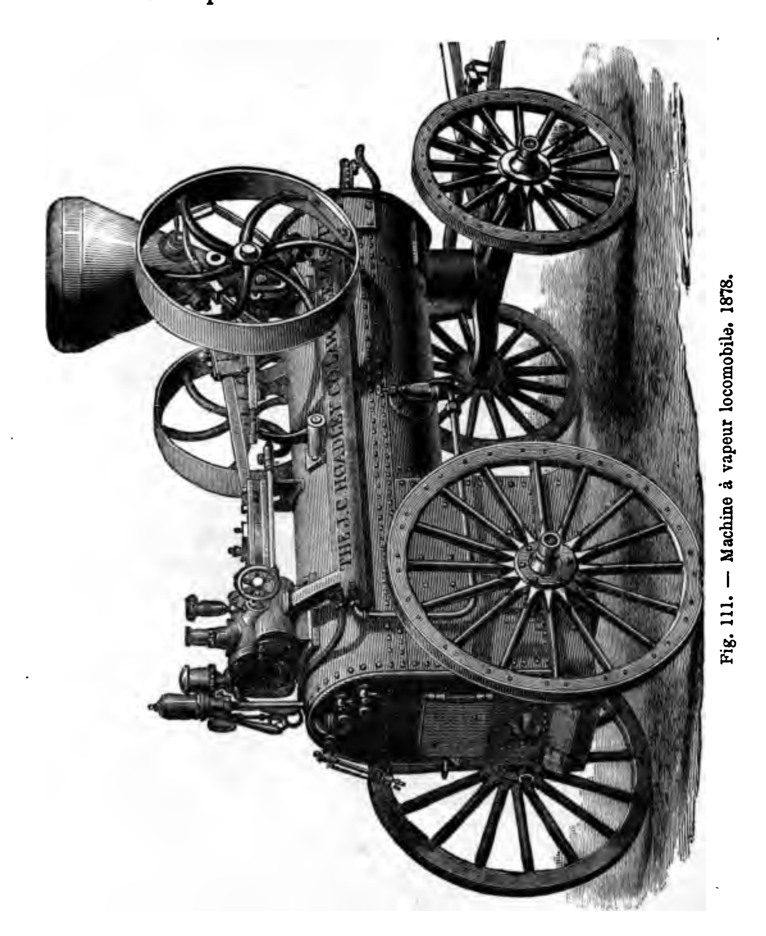


Fig. 111. — Machine à vapeur locomobile, 1878.

dessus de la chaudière, et que toutes les parties en sont apparentes et à portée du mécanicien.

Dans une de ces machines, d'une puissance de 20 chevaux, le cylindre a 10 pouces de diamètre, et le piston 18 pouces de course. Le volant fait 125 révolutions par minute; la grille a 9 pieds carrés et la surface de chauffe 288.

La machine pèse 4 1/2 tonnes, et la vapeur y est employée à la pression de 125 livres par pouce carré.

Dans les machines du genre que nous venons de décrire, le tirage est obtenu par la vapeur d'échappement qui est dirigée dans la cheminée. Ces machines se vendent aujour-

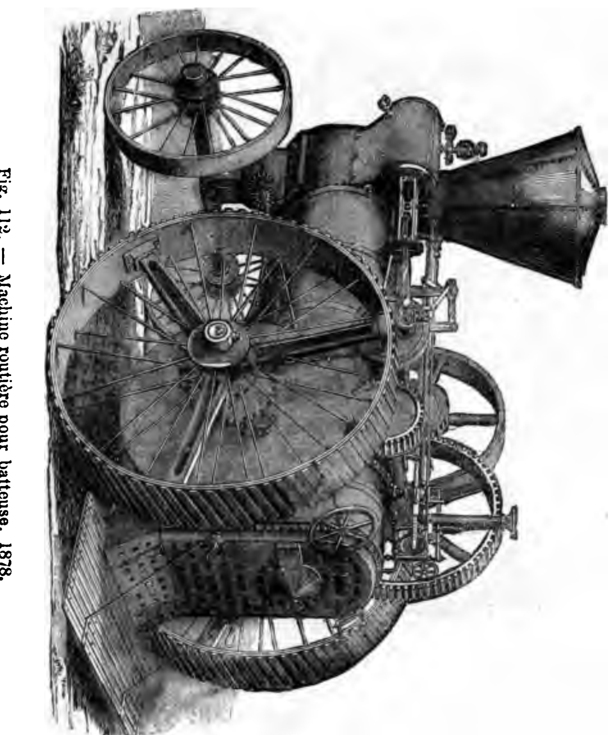


Fig. 112. — Machine routière pour batteuse. 1878.

d'hui de 120 à 150 dollars par cheval, suivant les dimensions et la qualité, les petites machines coûtant relativement plus cher. La consommation habituelle de combustible est de 4 à 6 livres par cheval et par heure, chaque pied carré de grille brûlant de 15 à 20 livres de charbon, dont chacune transforme en vapeur 8 livres d'eau à peu près. Le poids ordinaire, pour les grandes dimensions, est de 500 livres par cheval.

Ces machines sont quelquefois disposées pour se transporter elles-mêmes. La machine routière pour batteuse, représentée ci-dessus (fig. 112), est organisée de façon à remorquer sur les routes ordinaires un réservoir contenant 10 barils d'eau ou même davantage, plus une machine à vanner, et pour faire marcher une batteuse ou une scierie, en développant une force de 20 à 25 chevaux. Ce spécimen de machine routière a une chaudière construite pour fournir la vapeur à 250 livres de pression et elle peut atteindre une puissance maximum de 30 chevaux.

Cette machine a un tiroir équilibré et une détente auto-



Fig. 113. — Voiture à vapeur de Fisher.

matique; et elle est munie d'un dispositif pour renverser la vapeur, pour le cas où elle circule sur les routes. Les roues motrices sont en fer forgé, de 56 pouces de diamètre sur 8 pouces de large, avec des bras en fonte pour les roues motrices. Les deux roues d'arrière sont motrices dans les courbes aussi bien que sur les alignements droits. La machine peut être conduite et chauffée par un seul homme, et son poids total est si faible qu'elle peut passer en toute sûreté sur tous les ponts bien établis qu'on rencontre à la campagne. Elle est pourvue d'un frein pour éviter tout danger dans les descentes; en marche normale, elle fait environ 3 milles à l'heure, mais la vitesse du piston peut être augmentée au besoin et donner un parcours de 4 milles à l'heure.

C'est en somme un excellent spécimen de ces sortes de machines, telles qu'on les construit aujourd'hui. La chau-

dière solide avec son réchauffeur, le cylindre avec chemise, le bâti à la fois fort et léger, les organes du mouvement en acier, les surfaces du cylindre et de la chaudière soigneusement protégées, enfin les proportions parfaites de tous les organes constituent un bel exemple de construction moderne et forment un singulier contraste avec les premières machines de ce genre, construites il y a un siècle par Smeaton.

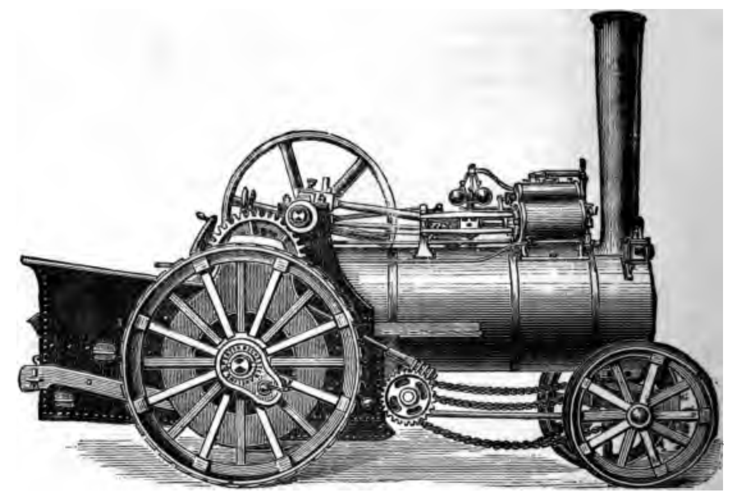


Fig. 114. — Locomotive routière et agricole.

On fait rarement aujourd'hui des voitures à vapeur pour les voyageurs. La figure 113 représente celle imaginée par Fisher, vers ou un peu avant l'année 1870. Elle n'a fonctionné qu'à titre d'essai.

La figure 114 représente une locomotive routière et agricole, telle que les construit une des meilleures maisons anglaises qui s'occupent de ce genre de travail.

La puissance de ces machines a été déterminée expérimentalement par l'auteur aux États-Unis, et à l'étranger par plusieurs ingénieurs distingués.

L'auteur en a essayé une à South-Orange (New-Jersey), pour mesurer sa force, sa vitesse et apprécier ses facilités

de manœuvre et de fonctionnement. Les principales dimensions en sont données dans le tableau suivant :

Poids de la machine en service, 5 tonnes 4 quintaux.	11,648 livres.
Cylindre à vapeur — diamètre.................	7 3/4 poucés.
Course du piston............................	10 »
Tours de la manivelle pour une des roues motrices.	17 »
Roues motrices — diamètre....................	60 »
» largeur.....................	10 »
» poids (chacune)............	450 livres.
Chaudière — longueur totale extérieure........	8 pieds.
» diamètre du corps cylindrique....	30 pouces.
» épaisseur de la tôle du corps cylindrique.......................	7/16 de pouce.
» épaisseur des tôles de la boîte à feu extérieure.................	1/2 pouce.
Charge sur les roues motrices, 4 tonnes 10 quintaux.	10,080 livres.

La chaudière était du type ordinaire pour locomotive, et la machine était montée au-dessus, comme c'est l'usage dans les locomobiles.

Le cylindre avait une chemise de vapeur, suivant l'usage des bons constructeurs de l'Amérique et des autres pays. L'arbre et autres parties en fer forgé, destinés à supporter des efforts considérables, étaient solides et complètement ajustés. Les engrenages étaient en fonte malléable ; les paliers de la machine et tous ceux de la transmission, jusqu'aux roues motrices, étaient portés, sur chaque côté, par une feuille unique de tôle d'un demi-pouce d'épaisseur, qui formait aussi les faces latérales de la boîte à feu extérieure.

Voici le résumé des conclusions formulées par l'auteur à la suite de ces épreuves et publiées dans le *Journal de l'Institut Franklin :* Il est possible de construire une machine à traction de façon qu'elle manœuvre aisément et rapidement sur les routes ordinaires ; et on peut arriver à faire parcourir sans difficulté à une machine pesant plus de 5 tonnes un cercle de 18 pieds de rayon, ou même à la faire tourner sur une route dont la largeur surpasse à peine la longueur de la machine. On a construit une locomotive de 5 tonnes 4 quintaux, capable de remorquer sur une

bonne route 23,000 livres, le long d'une rampe de 533 pieds au mille, avec une vitesse de 4 milles par heure; et on pourrait en faire une qui traînerait plus de 63,000 livres en montant une rampe de 225 pieds au mille, avec une vitesse de 2 milles à l'heure.

Il fut également constaté que, sur une bonne route macadamisée, le coefficient de résistance pour des chariots lourdement chargés ne s'éloigne pas beaucoup de 0,04. La puissance de traction de cette machine équivaut à celle de 20 chevaux : le poids qu'elle put, en dehors du sien propre, traîner sur une route horizontale, fut de 163,452 livres; la consommation de combustible est évaluée à 500 livres par jour.

Les avantages qu'on fait valoir en faveur de la traction à vapeur, comparée à l'emploi des chevaux, sont : la possibilité d'un travail permanent; l'économie dans les frais de premier établissement. Pour traîner de lourds fardeaux sur une route ordinaire, les dépenses de traction par la vapeur ne dépassent pas 25 pour 100 du prix moyen auquel revient le travail des chevaux, puisqu'une machine capable de faire l'ouvrage de vingt-cinq animaux ne dépense pas plus que six ou huit. Le prix de revient du transport des lourds fardeaux a été évalué à 7 cents (0 fr. 35) par tonne et par mille.

On commence à utiliser ces machines pour le labourage à la vapeur. Deux systèmes sont adoptés. Dans l'un, la machine est fixe et remorque, au moyen d'un cabestan et d'une corde en fils métalliques, un train de charrues; dans l'autre, une ou plusieurs charrues sont traînées directement par la machine, qui parcourt elle-même le champ. Cette dernière méthode a été proposée pour défricher les terrains de la Prairie.

Ainsi, trente ans après la défaite de l'intelligent, courageux et tenace Hancock, et de ceux qui, comme lui, avaient essayé d'employer utilement la machine à vapeur sur les routes ordinaires, nous trouvons des indices tendant à prouver que, sous une forme nouvelle, le problème vient d'être attaqué encore une fois, et, au moins en partie, résolu.

Une des conditions les plus importantes à réaliser au préalable, pour arriver au succès définitif dans la substitution de la vapeur aux chevaux sur les grandes routes, c'est de construire celles-ci d'une façon convenable. De même que l'on ne recule devant aucune étude, devant aucunes dépenses, si considérables qu'elles soient, pour obtenir des rampes douces et des courbes allongées sur nos chemins de fer, on est fondé à croire que l'on comprendra l'utilité d'adopter des mesures analogues pour permettre aux locomotives routières de faire le service sur les routes ordinaires. Les obstacles naturels qui paraissent s'opposer à la solution de ce problème semblent en somme plus apparents que réels aux ingénieurs d'aujourd'hui. Le principal inconvénient à prévoir viendrait probablement de l'insouciance et de l'avarice des propriétaires de machines, qui pourraient, par économie, confier à des mécaniciens ignorants et incapables la direction de ces redoutables instruments, qui sont d'excellents serviteurs, mais parfois aussi de terribles maîtres. Néanmoins, de même que l'on a constaté, dans le transport des voyageurs par les chemins de fer, moins de morts et d'accidents de personnes qu'il n'y en avait avec les diligences, on verrait bientôt que la traction à vapeur sur les routes ordinaires entraînerait, pour les personnes ou les objets transportés, moins de risques qu'on n'en court aujourd'hui avec les chevaux.

La pompe à incendie à vapeur est encore une autre sorte de locomobile. C'est l'une des plus récentes applications de la vapeur, et on peut dire que c'est une création essentiellement américaine. Malgré des tentatives antérieures, le succès définitif de ces engins date seulement des quinze dernières années.

Dès 1830, Braithwaite et Ericsson de Londres construisirent une machine munie d'un cylindre à vapeur actionnant une pompe. Les diamètres étaient de 7 pouces pour le cylindre à vapeur et de 6 1/2 pouces pour la pompe, avec 16 pouces de course commune de piston. Cette machine pesait 2 1/2 tonnes et on assure qu'elle lançait 150 gallons

d'eau par minute à une hauteur comprise entre 80 et 100 pieds. Elle était prête à fonctionner vingt minutes après l'allumage des feux. Plus tard, en 1832, Braithwaite fournit au roi de Prusse une machine encore plus puissante.

La première pompe à incendie à vapeur qui ait été construite aux États-Unis fut probablement celle de Hodge, qui en fit une à New-York en 1841. C'était une machine solide et très puissante; mais elle était beaucoup trop lourde pour se prêter à des déplacements rapides. J.-K.Fisher, qui pendant toute sa vie défendit avec persistance la cause des voitures à vapeur et des locomotives routières et en construisit plusieurs, avait aussi fait le plan d'une pompe à incendie à vapeur. Deux de ces pompes furent construites sur ses dessins, vers 1860, par l'usine Novelty de New-York, pour MM. Lee et Larned. Ces machines se déplaçaient par l'action de la vapeur, et l'une d'elles, destinée à la ville de Philadelphie, s'y rendit par la grande route sans l'aide d'aucun remorqueur. L'autre, construite et employée pour le service des incendies de New-York, y fit un bon service pendant plusieurs années. Ces machines étaient lourdes, mais très puissantes ; à la vapeur, elles se mouvaient avec une vitesse convenable et manœuvraient aisément.

Bientôt après, MM. Latta, de Cincinnati, réussirent à construire des machines à la fois légères et très puissantes; et le corps des pompiers de cette ville fut le premier à adopter définitivement les pompes à vapeur comme moyen d'action principal. On ne tarda pas à les imiter presque partout.

Aujourd'hui la pompe à vapeur a remplacé entièrement les anciennes pompes à main dans toutes les grandes villes. Elle travaille à moindres frais. Elle peut refouler l'eau à une hauteur de 225 pieds et la lancer à plus de 300 pieds horizontalement; tandis que la pompe à bras peut rarement atteindre au tiers de ces distances. Enfin la pompe à vapeur peut soutenir un travail de plusieurs heures si c'est nécessaire, tandis que les hommes qui manœuvrent la

pompe à bras se fatiguent rapidement et doivent être relevés fréquemment. La ville de New-York a 40 pompes à vapeur. Une pompe par 10,000 habitants paraît une proportion convenable.

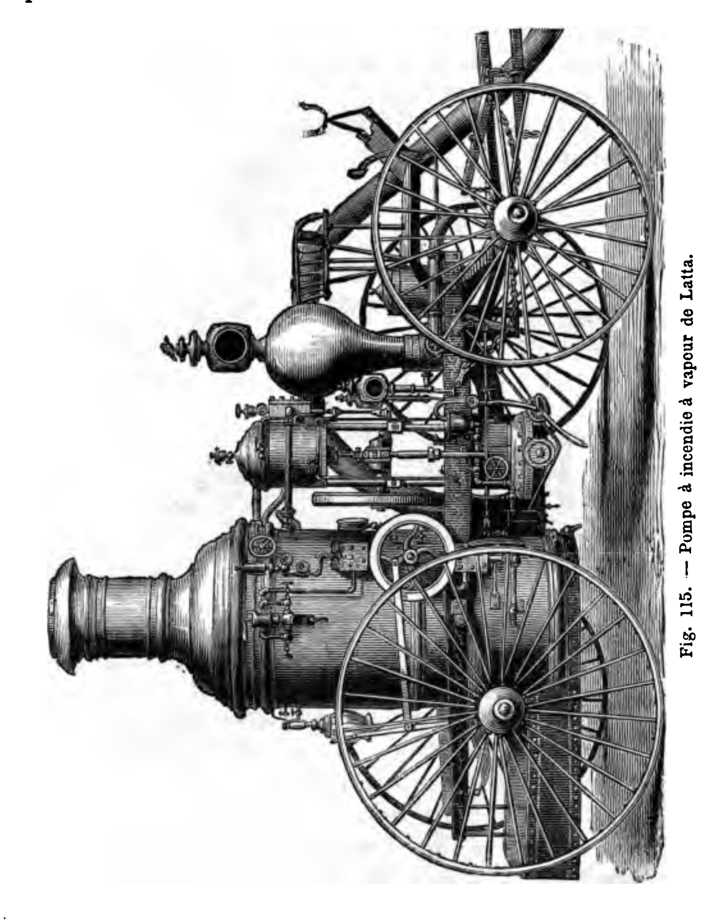


Fig. 115. — Pompe à incendie à vapeur de Latta.

Dans le modèle ordinaire (fig. 115), on a adopté des cylindres à vapeur et des pompes à mouvement alternatif, comme on le voit en coupe dans la figure 116 : A foyer, B tubes à feu verticaux très rapprochés, C boîte à fumée, D cheminée, R réservoir de vapeur. Deux systèmes pareils,

cylindre à vapeur et pompe, actionnent des manivelles rectangulaires avec volant placé en arrière. G pompe ali-

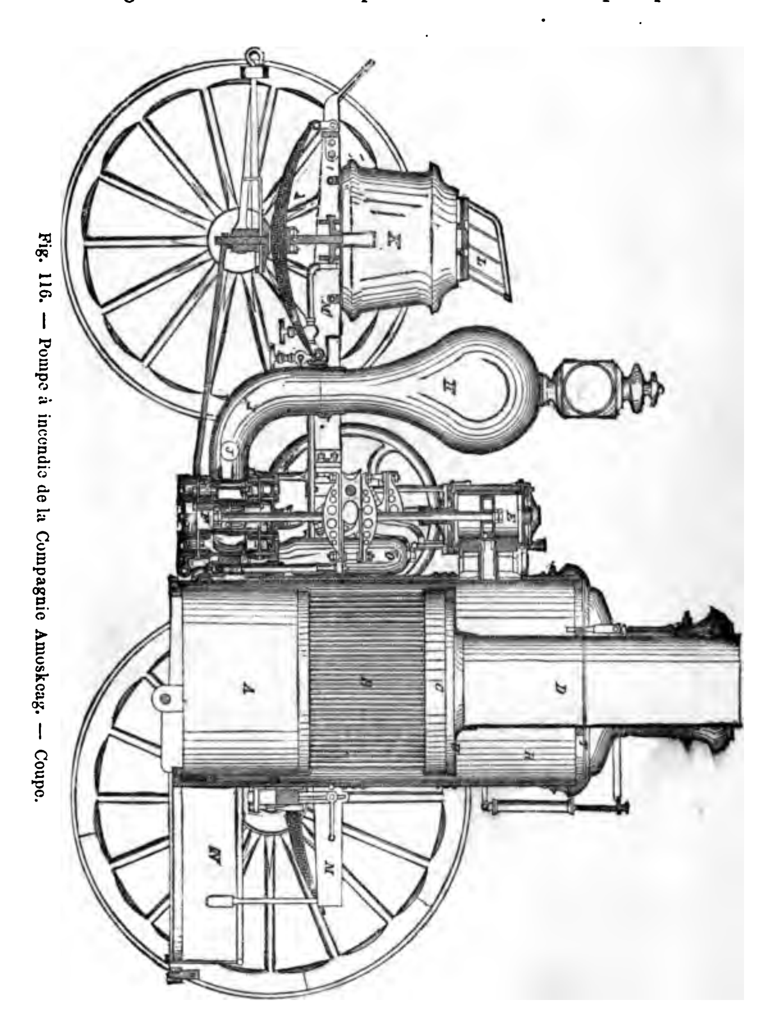


Fig. 116. — Pompe à incendie de la Compagnie Amuskeag. — Coupe.

mentaire, H chambre à air pour régulariser la pression de l'eau, qui afflue par le tube IJ, K réservoir d'eau d'alimentation placé sous le siège du conducteur L; l'ensemble

est porté sur le bâti MM. Le pompier se tient sur la plate-forme N. Quand il s'agit de déplacer la machine, une chaîne sans fin met en relation l'arbre de couche avec les roues arrière, les pompes sont débrayées et l'appareil se meut à la vitesse qu'on désire.

Voici, comme exemple, quelques renseignements sur les dimensions d'une machine de la Compagnie Amoskeag, automobile, et les résultats qu'elle a fournis : Poids, 4 tonnes; vitesse, 8 milles à l'heure; pression de la vapeur, 75 livres par pouce carré; hauteur du jet, avec un tuyau de 1 1/4 pouce, 225 pieds; avec un tuyau de 1 3/4 pouce, 150 pieds; portée horizontale, avec le premier tuyau, 300 pieds; avec le second, 250 pieds. Tous ces résultats contrastent d'une manière frappante avec ceux des pompes à main, que les pompes à vapeur ont maintenant supplantées.

Récemment on a construit plusieurs pompes à vapeur du système rotatif (pl. XII). La supériorité du mouvement rotatif pour les machines à vapeur est, en apparence, si évidente, que de nombreuses tentatives ont été faites pour surmonter les difficultés que ce système présente dans la pratique. Une de ces difficultés, la principale, a toujours été d'obtenir une garniture convenable pour l'organe qui fait office de piston. Robert Stephenson a exprimé autrefois l'opinion que cet obstacle empêcherait toujours une machine rotative de fonctionner convenablement. Les avantages les plus manifestes sont : les faibles dimensions de la machine, qui, assure-t-on, doivent résulter de la grande vitesse du piston ; la suppression des efforts anormaux qui se produisent parfois, notamment dans la propulsion des navires; et enfin une grande économie de la force qu'on prétend être dépensée inutilement, dans les machines à mouvement alternatif, pour vaincre l'inertie à chaque changement dans le sens de la marche des organes. Par suite, le système rotatif convient particulièrement pour les locomotives ou les pompes à vapeur.

Dans la machine rotative de Holly (fig. 117), on a évité l'emploi des excentriques ou cames glissantes, organes

Pompe à vapeur à rotation de Silsby.

l'eau à une distance donnée, il suffit avec la machine rotative d'une pression de vapeur trois ou quatre fois moindre qu'avec toutes les machines à mouvement alternatif. Or, moins il faut de force pour faire le même travail, moins la fatigue et par suite l'usure sont considérables; on en conclut que les machines rotatives sont plus durables et plus sûres. Les pompes employées avec ces machines présentent, comme le montre la figure ci-dessus, une disposition assez analogue à celle de l'appareil qui leur donne l'impulsion. Chacun des deux pistons rotatifs porte trois longues dents, qui glissent contre les parois du cylindre et sont munies, pour empêcher les fuites, d'une garniture en tout semblable à celle des cames de la machine. Ces pistons sont calés sur des arbres en acier solidaires des arbres de la machine. L'eau entre en E pour ressortir en F, et on a eu soin de ménager, aux passages qu'elle traverse, une largeur suffisante pour faciliter l'évacuation des graviers, de la boue et des détritus de toute sorte qu'elle peut entraîner. Il en résulte que ces pompes sont beaucoup moins exposées à être dégradées par les eaux troubles ou sablonneuses; et on affirme qu'elles peuvent sans inconvénient fonctionner pendant des années avec des eaux qui mettraient bientôt une pompe à piston hors de service.

L'usage des machines rotatives s'introduit peu à peu pour différents cas spéciaux, lorsqu'on n'a besoin que d'une puissance faible et que l'économie de combustible n'est pas d'une grande importance; mais elles n'ont pas encore rivalisé, et ne rivaliseront peut-être jamais dans l'avenir, avec celles à piston ordinaires, pour les grandes puissances et chaque fois que la dépense de combustible entre en ligne de compte. En réalité, ce type de machine n'a joué qu'un rôle fort secondaire dans les applications de la vapeur, et l'on sait relativement peu de chose de son histoire. Watt inventa une machine rotative, et, bien longtemps après, en 1836, Yule en construisit quelques-unes à Glasgow. Lamb en fit breveter une nouvelle en 1842, et Behrens une autre encore en 1847. Napier, Hall, Massey, Holly, La France et bien d'autres, ont construi des

machines de ce système dans ces derniers temps. Tantôt c'est une série de cames disposées autour d'un cylindre tournant, comme ci-dessus; ou bien c'est un piston plat, placé suivant le rayon d'un cylindre de petit diamètre qui tourne sur son axe, à l'intérieur d'un autre beaucoup plus gros et disposé excentriquement; pendant ce mouvement de rotation, le piston va et vient, en coulissant dans le petit cylindre, tandis que ses bords extérieurs glissent le long de la surface interne du gros. Dans quelques systèmes, un piston tourne sur un arbre central, et une valve radiale, glissant dans la paroi du cylindre extérieur, sert à séparer la face sur laquelle arrive la vapeur de la face opposée, et à former un compartiment clos dans lequel le fluide agit. Presque toutes ces combinaisons sont aussi usitées pour les pompes.

Les pompes à incendie des constructeurs américains les plus connus, avec machine et pompe à mouvement alternatif, telles qu'elles sont généralement employées aux États-Unis, ont servi de modèles, aussi bien pour la disposition de l'ensemble que pour l'agencement des détails. Elles semblent présenter les meilleurs exemples d'extrême légèreté, combinée avec la solidité des organes et la puissance d'action, qu'on ait jamais produits dans aucune branche des arts mécaniques. En employant une petite chaudière présentant une énorme surface de chauffe, disposée et proportionnée méthodiquement, et où la masse d'eau est très divisée, en adoptant l'acier pour la confection des organes moteurs, partout où c'est possible, en adoptant de hautes pressions et une grande vitesse pour le piston, en choisissant enfin le combustible avec le plus grand soin, on a fini par amener en Amérique la pompe à vapeur à un degré de perfection et d'efficacité bien supérieur à tout ce qu'on peut voir autre part. La vapeur se produit avec une rapidité merveilleuse, même quand le liquide est froid au début; les lances adaptées au bout de longs tuyaux envoient encore l'eau à de très grandes distances. Mais on n'obtient cette réunion de la force et de la légèreté qu'aux dépens d'une certaine régularité d'action, à

laquelle on ne pourrait arriver qu'en donnant aux chaudières une capacité plus considérable. La petite quantité d'eau qu'elles contiennent oblige de veiller sans cesse à l'alimentation; et la tendance, qu'elles ont presque toutes, à donner lieu à des bouillonnements et à des entraînements d'eau oblige à des soins constants pendant la marche, et introduit un élément dangereux dont il faut tenir compte, même quand la machine est confiée aux mains les plus expérimentées et les plus habiles. Encore tout le soin et toute l'habileté du chauffeur ne suffiraient pas à empêcher les explosions; heureusement il est fort rare que le manque d'eau occasionne des accidents dans ces sortes de chaudières, à moins qu'on ne les laisse se vider complètement. En service, le liquide bouillonne presque toujours avec une telle violence, qu'il est absolument impossible d'avoir aucune indication sur la quantité d'eau contenue; le mécanicien fait constamment fonctionner sa pompe alimentaire, et laisse le bouillonnement aller son train. Aussi longtemps que de l'eau pénètre dans la chaudière, on n'a guère à craindre que le métal se brûle et qu'un accident se produise. Le procédé semble brutal, et cependant les accidents provenant de cette cause sont extrêmement rares.

Les modifications apportées dans ces dernières années à la construction des locomotives ont également consisté dans le perfectionnement des types primitifs et ont été accompagnées de changements correspondants dans toutes les parties du matériel des voies ferrées. Des organes mieux ajustés, mieux proportionnés au travail à faire, des modifications de détail, conséquence des modifications d'ensemble, une main-d'œuvre plus parfaite, des matériaux de meilleure qualité, tels sont les traits caractéristiques de la dernière période. On a aussi imaginé des formes spéciales de machines destinées à des usages particuliers. Ainsi, pour les manœuvres de gare, on emploie de petites et légères machines-tenders (fig. 119) qui portent avec elles leur eau et leur combustible. On se sert de locomotives puissantes, lourdes et lentes, à vaste chaudière et petites roues, pour gravir les fortes rampes et remorquer les longs trains

chargés de charbon ou autres marchandises pesantes. On fait usage enfin, pour le service de la poste et des voyageurs, de machines-express, non moins puissantes, mais tout autrement organisées.

On doit à Forney une disposition particulière de locomotive (fig. 120), dans laquelle tout le poids de la machine, du tender, de l'eau et du charbon est porté par un seul et même châssis et sur un seul groupe de roues, la charge



Fig. 119. — Machine-tender. — Chemin de fer aérien de New-York.

permanente portant exclusivement sur les roues motrices, et la charge variable sur le truck. Ces machines ont une base d'appui relativement courte et une grande puissance de traction.

Les machines-tenders, dont nous avons parlé ci-dessus, pèsent de 8 à 10 tonnes; mais on en fait de beaucoup plus légères encore pour le service des mines, où elles vont dans les galeries remorquer les wagons de charbon. On en construit aussi de plus lourdes, pesant jusqu'à 20 ou 30 tonnes. La plus puissante qu'on ait encore mise en service aux États-Unis est, dit-on, une locomotive employée sur la ligne de Reading à Philadelphie, qui pèse environ 100,000 livres (45 tonnes) et repose sur 12 roues motrices.

Une locomotive comporte deux cylindres à vapeur, placés, soit côte à côte en dedans du châssis et immédiatement sous l'extrémité antérieure de la chaudière, soit extérieurement au châssis et sur chacun de ses côtés. Ces machines

sont toujours sans condensation et construites aussi simplement que possible. Tout l'ensemble est porté sur des ressorts en acier souples et solides. La pression de la vapeur

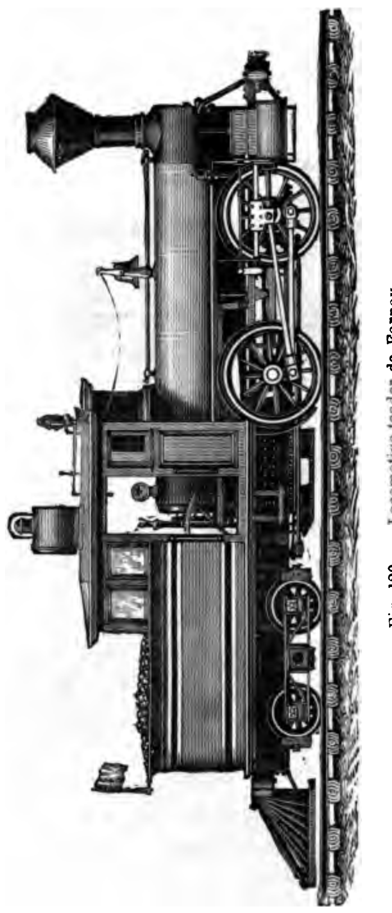


Fig. 120. — Locomotive-tender de Forney.

dépasse habituellement 100 livres au pouce carré. La force de traction est d'ordinaire un cinquième de la charge adhérente dans les circonstances les plus favorables, et peut descendre à un dixième quand les rails sont humides.

Le combustible employé est le bois dans les pays neufs, le coke dans les districts à charbon bitumineux, et l'anthracite dans l'est des États-Unis. La disposition générale et les proportions des locomotives diffèrent quelque peu suivant les localités.

Dans la figure 121, qui représente une machine-express anglaise, O est la chaudière, N la boîte à feu, X la grille, G la boîte à fumée, et P la chéminée. S est une soupape de sûreté à ressort, R une autre à levier; T est le sifflet, L le

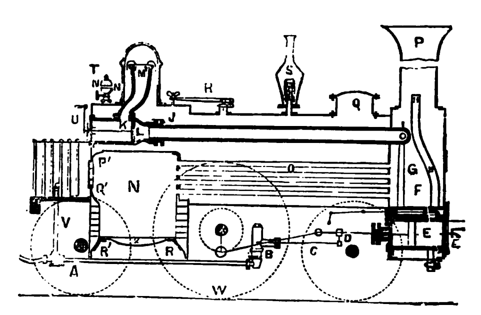


Fig. 121. — Machine express anglaise.

registre ou régulateur, E le cylindre et W la roue motrice. La pompe alimentaire BC est manœuvrée par la crosse du piston D. Le châssis sert d'appui à tout le système et toutes les autres pièces y sont fixées solidement. L'une des extrémités de la chaudière est fixée au châssis, et toute facilité lui est laissée pour se dilater quand elle est chauffée. Pour obtenir une adhérence suffisante, on fait porter une fraction convenable du poids sur la roue motrice W. Cette fraction varie, par roue, depuis 6,000 livres environ, pour les machines à marchandises qui ont plusieurs essieux moteurs, jusqu'à 10,000 livres pour celles à voyageurs, qui n'en ont qu'un.

Les particularités du type américain (fig. 122) sont : le truck IJ ou *bogie*, qui supporte la partie antérieure de la machine; le système de balanciers compensateurs, qui répartissent également le poids de la machine sur les différents essieux, et quelques autres détails. Le *cab*, ou cabiner,

pour protéger le chauffeur et le mécanicien, est une dispo-

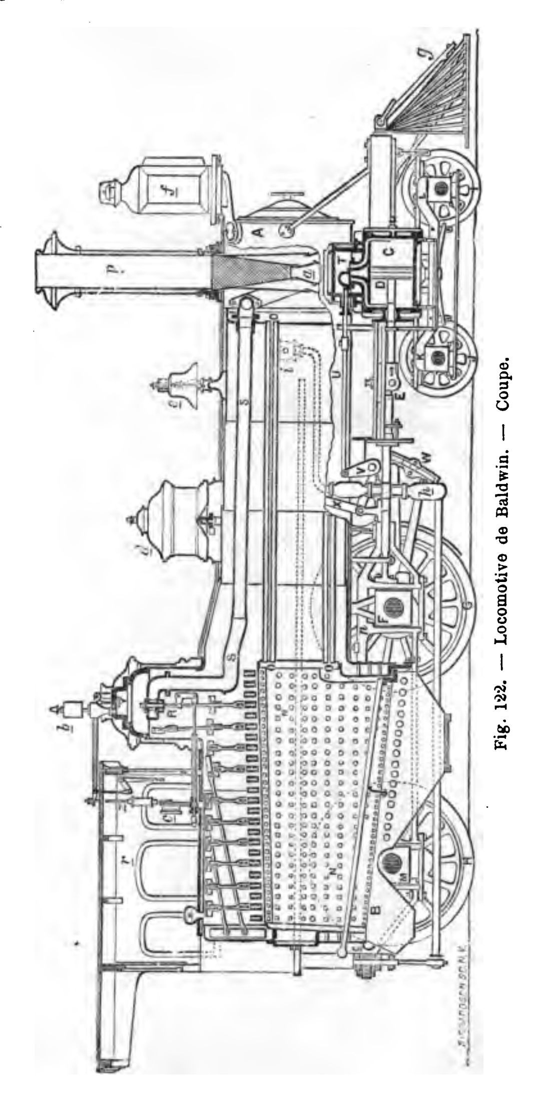


Fig. 122. — Locomotive de Baldwin. — Coupe.

sition américaine qui tend à se répandre à l'étranger. La locomotive américaine se distingue par sa souplesse et l'ai-

sance de ses mouvements, même sur les voies grossièrement établies. Dans le dessin ci-dessous, qui montre en coupe un type de machine américaine, AB est la chaudière, C l'un des cylindres, D le piston, E la crosse reliée par la bielle à l'essieu moteur F; G, H sont les roues motrices, I, J les roues du truck, portant le truck KL; MN est la boîte à feu, O, O sont les tubes (quatre seulement sont représentés). Le tuyau d'amenée RS conduit la vapeur à la boîte T, dans laquelle on voit le tiroir mû par la transmission UV, et la coulisse W. Cette dernière peut être élevée ou abaissée au moyen d'un levier X, qu'on fait mouvoir de la cabine *r*. On voit la soupape de sûreté au sommet du dôme en Y, et en Z la balance à ressort qui permet d'en régler la charge. En *a* est la buse d'échappement terminée en cône, qui produit le tirage. Les accessoires *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* — sifflet, manomètre, boîte à sable, cloche, fanal et chasse-bœufs — sont presque tous particuliers, soit comme dispositions, soit comme emplacement, à la locomotive américaine. Le prix des locomotives à voyageurs de dimension ordinaire est d'environ 12,000 dollars; les machines plus lourdes en coûtent quelquefois jusqu'à 20,000. La locomotive est habituellement munie d'un tender qui porte son eau et son combustible. La machine à voyageurs du chemin de fer de Pensylvanie a quatre roues motrices de 5 1/2 pieds de diamètre; le diamètre des cylindres est de 17 pouces, et la course des pistons de 2 pieds; la surface de grille a 15 1/2 pieds carrés et la surface de chauffe 1,058. Cette locomotive pèse 63,100 livres, dont 39,000 portent sur les roues motrices et 24,100 sur le truck. La machine à marchandises a six roues motrices de 54 5/8 pouces de diamètre; le diamètre des cylindres est de 18 pouces et la course du piston de 22; la grille a 14,8 pieds carrés de surface; la surface de chauffe est de 1,096. Le poids total est de 68,500 livres, dont 48,000 sur les roues motrices et 20,500 sur le truck. Sur une rampe de 90 pieds par mille en moyenne, la première de ces deux machines remorque un train de cinq voitures et la deuxième un train de onze; sur une pente de 50 pieds au mille, ces chiffres sont respectivement 7 et 17. On fait aussi des loco-

motives-tenders de grande puissance, pour le service sur les rampes très fortes atteignant 320 pieds au mille, comme en présentent quelques lignes dans les pays de montagnes.

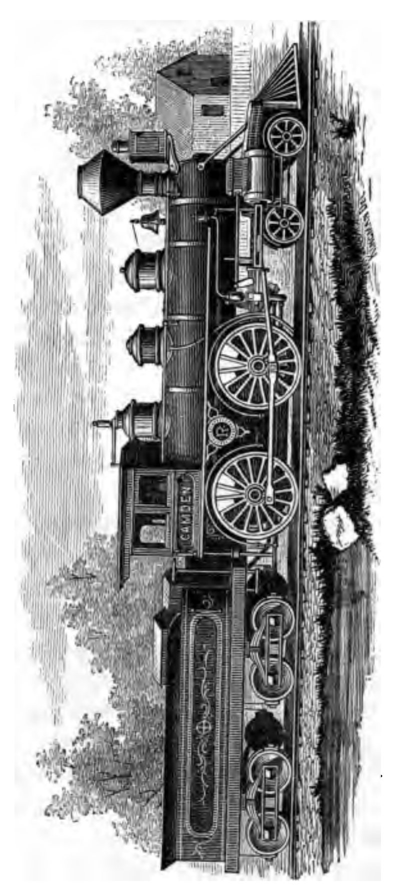


Fig. 123. — Le type américain de machine express. 1878

Ces machines sont à cinq paires de roues motrices et sans truck. Les cylindres ont 20 1/8 pouces de diamètre, le piston a 2 pieds de course; la surface de grille est de 15 3/4 pieds carrés, la surface de chauffe de 1,380. Avec le tender entièrement plein et approvisionnement complet de bois,

le poids atteint 112,000 livres; il est en moyenne de 108,000. Une de ces machines a remorqué 110 tonnes en remontant la pente citée plus haut, avec une vitesse de 5 milles à l'heure, la pression de la vapeur étant de 145 livres au pouce carré. L'adhérence était d'environ 23 pour 100 de la charge.

Lorsqu'il s'agit d'arrêter un train en mouvement, l'inertie de la machine elle-même absorbe une importante portion du travail des freins; pour leur venir en aide, on se sert quelquefois de la contre-vapeur. Pour éviter que cette opération n'amène le grippement des surfaces du piston, du cylindre, du tiroir et de sa glace, M. Le Châtelier lance un jet de vapeur dans les conduits d'échappement au moment où la vapeur est renversée; il empêche ainsi la rentrée de l'air chargé de poussières et le dessèchement des surfaces frottantes. Toutefois on a rarement recours à cette méthode pour arrêter un train, sauf en cas de danger. Le frein « continu » ou « à air », que le mécanicien peut faire agir au même instant sur toutes les voitures du train, est si efficace, qu'il est maintenant adopté à peu près partout. C'est là une garantie de sécurité de la plus haute valeur, due à l'esprit inventif des ingénieurs américains. Pour traîner un train pesant 150 tonnes à la vitesse de 60 milles à l'heure, il faut une puissance effective d'environ 80 chevaux-vapeur. On a souvent atteint la vitesse de 80 milles et peut-être même celle de 100 (160 kilomètres).

La locomotive américaine a une durée maximum qu'on peut évaluer à trente ans environ. Les frais de réparation annuels sont de 10 à 15 pour 100 du prix d'achat primitif. Sur une ligne à pente modérée, la machine consomme une pinte (0 lit. 567) d'huile par 25 milles et une tonne de charbon par 40 ou 50. Voici l'établissement du compte des dépenses mensuelles, sur l'un des chemins de fer les mieux administrés des États-Unis :

Nombre de milles parcourus par tonne de charbon brûlé.	53,95
— — par quart d'huile consommé	34,44
Nombre de voitures à voyageurs remorquées à 1 mille par tonne de charbon	275,70

Nombre de voitures autres que celles à voyageurs remorquées à 1 mille par tonne de charbon	634,80
Frais d'entretien par mille parcouru	2^{dol},43
Combustible — —	3^{dol},64
Graissage et usure — —	0^{dol},62
Personnel des mécaniciens et chauffeurs par mille parcouru	6^{dol},22
Autres dépenses par mille parcouru	1^{dol},91
Dépense totale — —	14^{dol},82

Quoique les figures et descriptions ci-dessus se rapportent au type de locomotive actuel, certains symptômes indiquent déjà que le système *compound* finira par être adapté à ces machines. Il en résultera un changement considérable dans les proportions : le volume et le poids des cylindres seront beaucoup augmentés, mais le poids de la chaudière et du combustible transporté sera réduit en proportion. En somme, cette transformation ne soulève pas d'objection sérieuse, pas plus qu'on ne rencontrerait de difficultés insurmontables dans la construction de la locomotive avec chemise de vapeur aux cylindres. Quelques machines de ce genre ont déjà été mises en service. Le cylindre à haute pression est placé d'un côté et le cylindre à basse pression de l'autre; de sorte qu'il n'y a en tout que deux cylindres comme précédemment. La distribution est commandée par la coulisse Stephenson, comme dans les machines ordinaires. Au départ, on laisse la vapeur agir directement sur les deux pistons; mais après quelques tours de roue l'on modifie la distribution, et, au lieu d'aller à la cheminée, la vapeur qui sort du petit cylindre se rend dans le gros, dont la communication avec la conduite d'amenée est interceptée. Quand on remonte une forte rampe, on peut, si c'est nécessaire, envoyer directement la vapeur de la chaudière dans les deux cylindres, comme au démarrage.

On a fait usage de machines de cette espèce sur la ligne française de Bayonne à Biarritz. Les plans en sont dus à l'ingénieur Mallet, et elles ont été construites au Creusot. Les cylindres ont respectivement 24 et 40 centimètres de diamètre, et 45 centimètres de course de piston. Les quatre

roues motrices ont $1^m,20$ de diamètre, et le poids total de la machine est de 20 tonnes. La chaudière a 45 mètres carrés de surface de chauffe; elle est établie pour une pression de 10 atmosphères. Pour traîner un train de 50 tonnes à la vitesse de 40 kilomètres par heure, ces machines exigent environ 5 kilogrammes de bon charbon par kilomètre.

La longueur totale des chemins de fer ouverts à la circulation, sur le territoire des États-Unis, au 1er janvier 1877, était de 76,640 milles [1], soit un mille en moyenne par 600 habitants.

En voici le tableau, par État :

	Milles.		Milles.
Alabama	1,722	Missouri	3,016
Alaska	0	Montana	0
Arizona	0	Nebraska	1,181
Arkansas	787	Nevada	714
Californie	1,854	New-Hampshire	942
Colorado	950	New-Jersey	1,594
Connecticut	925	New-Mexico	0
Dakota	290	New-York	5,520
Delaware	285	Caroline du Nord	1,371
Floride	484	Ohio	4,680
Géorgie	2,308	Orégon	251
Idaho	0	Pensylvanie	5,896
Illinois	6,980	Rhode-Island	182
Indiana	4,072	Caroline du Sud	1,352
Territoire indien	281	Tennessee	1,638
Iowa	3,937	Texas	2,072
Kansas	3,226	Utah	486
Kentucky	1,464	Vermont	810
Louisiane	539	Virginie	1,648
Maine	987	Washington	110
Maryland	1,092	Virginie de l'Ouest	576
Massachusetts	1,825	Wisconsin	2,575
Michigan	3,437	Wyoming	459
Minnesota	2,024		
Mississipi	1,028	Total	76,640

En 1873 survint la grande crise financière avec ses

1. En janvier 1878, elle était de 80,000 milles, soit 128,000 kilomètres

terribles résultats : production interrompue, pauvreté et famine, amenant une interruption presque totale dans la construction des chemins de fer. L'année 1872 est celle où l'on a construit la plus grande longueur de voies ferrées. Le territoire qui en possède le plus est l'Illinois où l'on en compte 6,980 milles ; ceux qui en ont le moins sont le Rhode-Island (182) et le territoire de Washington (110). L'État de Massachusetts a un mille de chemin de fer par 4,86 milles mètres carrés de territoire; c'est la proportion maxima qu'on rencontre dans le pays. La plus longue ligne existante est le *Chicago and Northwestern Railway*, de 1,500 milles de longueur. La plus courte est le *Little Saw Mill Run Road,* en Pensylvanie, qui n'en a que 3. Le capital total représenté par l'ensemble des voies ferrées américaines est de 6,000,000,000 de dollars (30 milliards de francs), soit en moyenne 100,000 dollars par mille. Les recettes pour 1872 se sont élevées à 454,969,000 dollars ou 7,500 par mille. Le produit net le plus fort qu'on ait mentionné est celui du *New-York central and Hudson River Railway,* qui fut de 8,260,827 dollars ; quant au bénéfice minimum, on le constate sur plusieurs lignes, qui non seulement n'en firent aucun, mais travaillèrent à perte.

La catastrophe de 1873-74 vint apprendre au public que ce dernier cas était beaucoup plus commun qu'on ne le supposait; et il est encore douteux que l'immense réseau ferré qui couvre aujourd'hui les États-Unis puisse arriver, dans son ensemble, à fournir même un revenu modéré pour le capital engagé dans sa construction. A l'époque où l'extension des chemins de fer avait atteint la plus grande activité aux États-Unis, c'est-à-dire en 1873, les longueurs totales des réseaux pour les différents pays d'Europe et l'Amérique étaient les suivantes[1] :

1. *Railroad Gazette.*

CHEMINS DE FER D'EUROPE ET D'AMÉRIQUE EN 1873

PAYS	LONGUEUR des lignes en milles anglais (1,609m.)	POPULATION.	SURFACE en milles carrés (2,6 kil. carrés).
États-Unis.	71.565	40,232.000	2,492,316
Allemagne.	12,207	40.111.265	212,091
Autriche.	5.865	35.943.592	227,234
France.	10.333	36.469.875	201,900
Russie d'Europe . . .	7.044	71,207.794	1.992.574
Gde-Bretagne (1872). .	15.814	31.817,108	120.769
Belgique.	1.301	4.839.094	11,412
Pays-Bas.	886	3.858.055	13,464
Suisse.	820	2.669,095	15,233
Italie.	3.667	26.273.776	107,961
Danemark.	420	1.784.741	14,453
Espagne.	3.401	16.301.850	182,758
Portugal.	453	3.987.867	36,510
Suède et Norvège . . .	1.049	5.860.122	188,771
Grèce	100	1,332.508	19,941

Les chemins de fer de la Grande-Bretagne comprennent plus de 15,000 milles de voies en service, pour lesquels il a été dépensé 2,800,000,000 de dollars. Cette somme est égale à cinq fois le revenu annuel du pays, et aux deux tiers de la dette nationale. Déduction faite de toutes les dépenses d'exploitation, le revenu net annuel de toutes les lignes surpasse de 110,000,000 de dollars le budget total des recettes de la Belgique, de la Hollande, du Portugal, du Danemark, de la Suède et de la Norvège. Une armée de 100,000 officiers et employés est au service des compagnies, et la valeur du matériel roulant dépasse 150,000,000 de dollars.

CHAPITRE III

NAVIGATION A VAPEUR.

Les changements aujourd'hui réalisés dans la machine à vapeur marine sont postérieurs à ceux qui ont produit la locomotive moderne. Sur les fleuves d'Amérique, la machine à balancier n'a été que très légèrement modifiée depuis le temps de Robert L. Stevens. La disposition générale a été conservée et les détails diffèrent peu. La pression de la vapeur s'élève quelquefois jusqu'à 60 livres par pouce carré.

La distribution est faite par soupapes pleines, à mouvement vertical. Il y en a quatre, deux à l'admission, deux à l'échappement, à chaque extrémité du cylindre. La machine à balancier est un type essentiellement américain, qu'on ne rencontre que bien rarement dans les autres pays. La figure 124 représente une machine de ce genre, construite pour un steamer qui navigue sur l'Hudson. Cette disposition est la plus habituelle pour les bâtiments de grande longueur, à grande vitesse et de faible tirant d'eau. On n'emploie généralement qu'un seul cylindre. La tige du piston est reliée à une extrémité du balancier, au moyen d'une paire de petites bielles, et le mouvement de l'extrémité opposée est transmis à la manivelle par une bielle de longueur moyenne. Le balancier est composé d'un centre en fonte, entouré d'une armature de fer forgé en forme de losange, dans laquelle sont venus de forge les logements des goujons d'articulation des bielles. Le centre d'oscillation du balancier repose sur un « bâti en potence », formé de

poutres disposées de façon à ne travailler que par bout. L'arbre et la manivelle sont en fer forgé. La distribution est habituellement du système déjà mentionné sous le nom de Stevens et inventé par les fils de ce grand ingénieur,

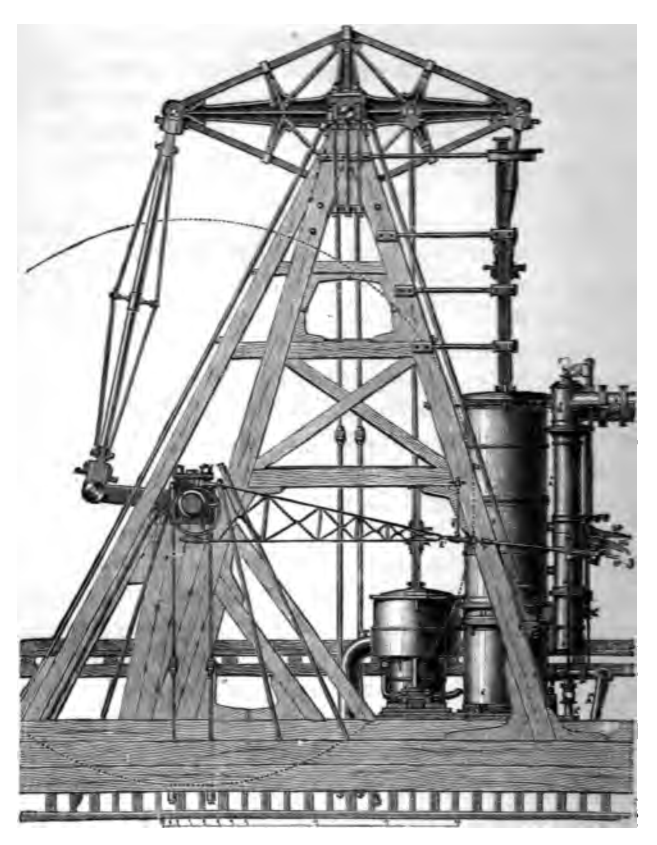


Fig. 124. — Machine de bateau à balancier.

Robert et Francis. Le condenseur est placé immédiatement au-dessous du cylindre. La pompe à air, disposée tout à côté, est manœuvrée par une tringle suspendue au balancier. Avec ces machines, les steamers de l'Hudson ont pu atteindre une vitesse de 20 milles à l'heure.

Elles sont remarquables par la douceur de leur fonctionnement, leur économie, leur longue durée, leur petit volume et la facilité avec laquelle elles se prêtent, sans se déranger, aux changements de forme des bâtiments longs et flexibles sur lesquels on les emploie généralement.

Pour les machines à aubes des grands vaisseaux, on se sert rarement aujourd'hui du système à balancier latéral, qui fut jadis en grande faveur. Pour les plus petits navires, on emploie encore beaucoup, en Europe, la machine oscil-

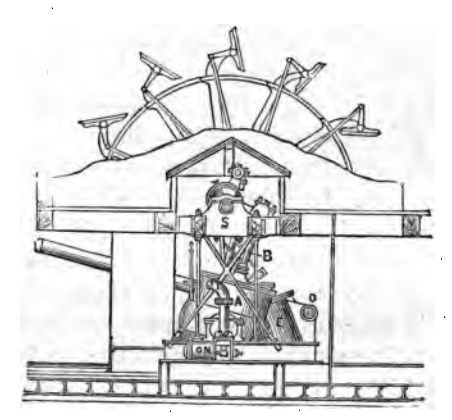


Fig. 125. — Machine oscillante avec roue à aubes articulées.

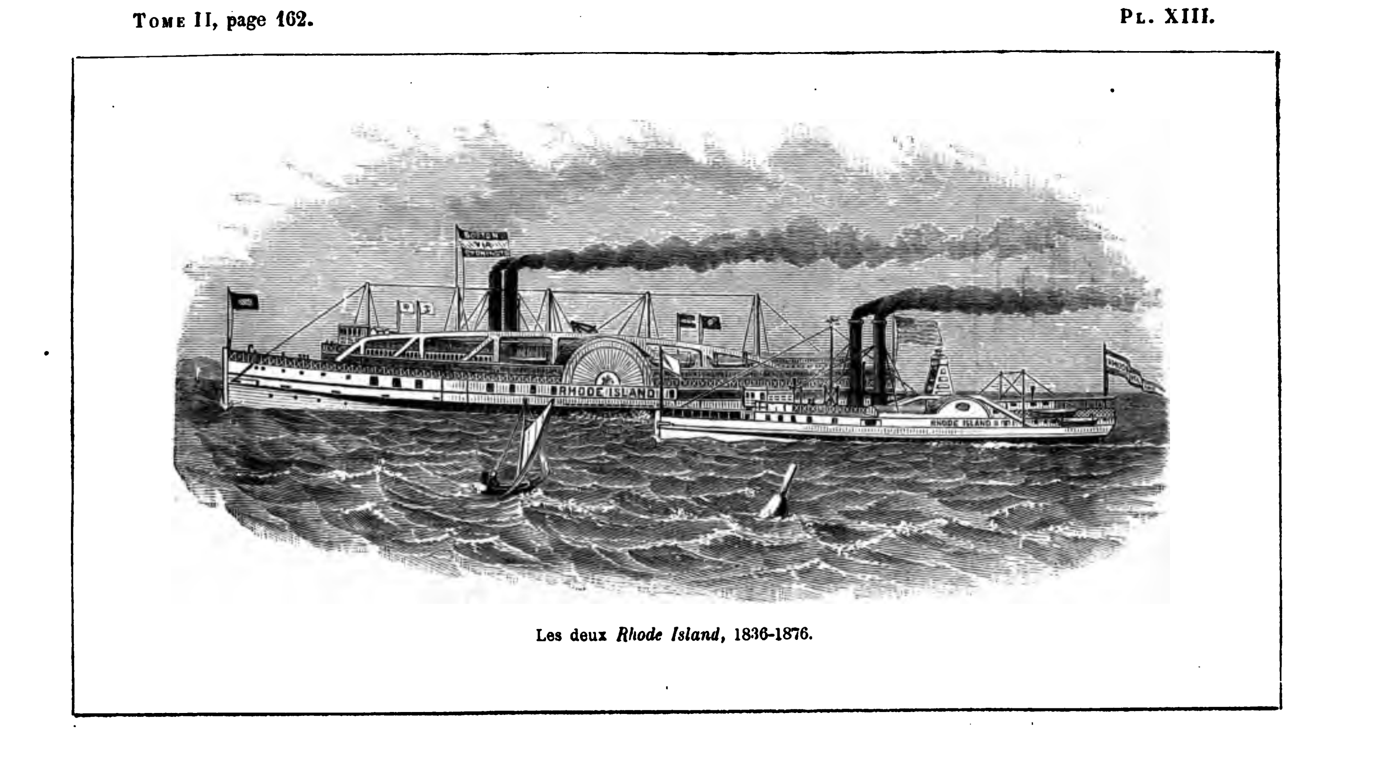
lante avec roues à aubes articulées. Ce type est représenté ci-dessus (fig. 125). Il est léger, tient peu de place, est assez économique et surtout très simple. Les proportions ordinairement adoptées sont telles, que la roue à aubes mobiles a autant d'action sur l'eau qu'une roue à aubes fixes de diamètre double. Cette réduction du diamètre des roues, sans diminuer la puissance maximum, permet d'obtenir une plus grande vitesse de rotation et par conséquent de réduire le poids, le volume et le prix de la machine. Les tambours de moindre volume, offrant moins de prise au vent, ne retardent pas autant la marche du bâtiment.

Pour faire mouvoir des roues à aubes, on fait usage quelquefois aussi de machines inclinées. Le cylindre est disposé obliquement et la bielle réunit directement la tige

du piston à la manivelle. Le condenseur et la pompe à air sont généralement au-dessous des glissières, et manœuvrés par un balancier coudé, que font mouvoir des bielles articulées fixées à la tige du piston et placées des deux côtés de celle-ci. Ces machines sont assez usitées en Europe et elles ont été adoptées aux États-Unis pour les chaloupes canonnières à roues. On les retrouve aussi sur les bacs à vapeur qui font le service entre New-York et Brooklyn.

Parmi les plus beaux spécimens de steamers à roues de construction moderne, on peut citer ceux construits pour les diverses lignes entre New-York et les villes de la Nouvelle-Angleterre, qui traversent le détroit de Long-Island. La planche XIII fait connaître la forme de ces navires et montre aussi les modifications introduites dans leur structure et leurs dimensions, pendant le cours de la présente génération. Le plus récent de ces bâtiments a 325 pieds de long, 45 de largeur de bau, 80 de largeur hors tambours et 16 pieds de profondeur; il cale 10 pieds d'eau. Les membrures de la coque sont en chêne blanc, les parties plus légères de la construction sont en bois de cèdre et de caroubier. La machine a un cylindre de 90 pouces de diamètre et 12 pieds de course de piston[1]; de chaque côté des grands salons, qui s'étendent d'un bout à l'autre du pont supérieur, sont des chambres de première classe, contenant chacune deux lits et élégamment meublées. La machine de ce bâtiment peut développer environ 2,500 chevaux-vapeur. Les grandes roues, dont on aperçoit les tambours s'élevant presque au niveau du pont volant, ont 37 1/2 pieds de diamètre et 12 de large. La coque, y compris toute la menuiserie, pèse plus de 1,200 tonnes. Le poids de la machine est d'environ 625. Quand les roues tournent à toute vitesse, — environ 17 révolutions par minute, — le steamer fait 16 nœuds à l'heure; et il parcourt son trajet de 160 milles avec une vitesse moyenne de 14 nœuds. La quantité de charbon nécessaire pour alimen-

1. Les cylindres des machines des steamers *Bristol* et *Providence* ont 110 pouces de diamètre et 12 pieds de course de piston.



Les deux *Rhode Island*, 1836-1876.

l'usage s'en répand rapidement. Les premiers qu'on construisit étaient lourds, compliqués et marchaient lentement; mais, grâce aux leçons de l'expérience, ils sont

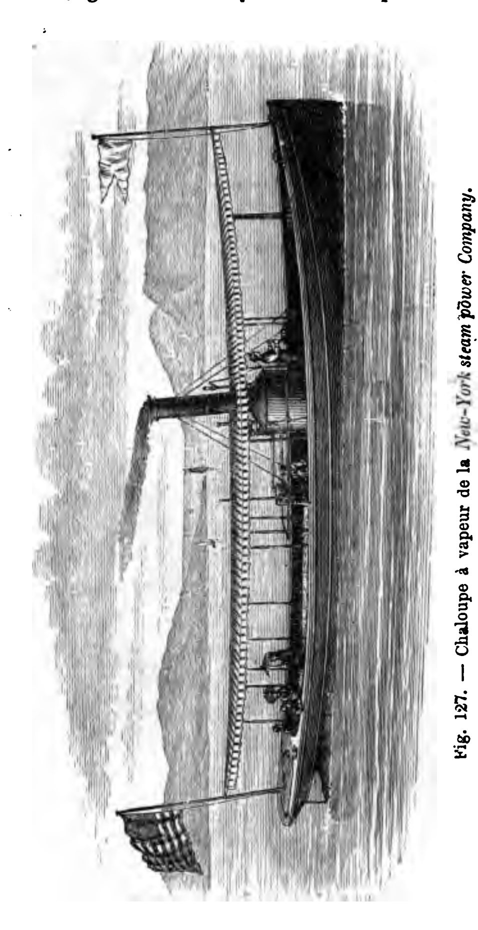


Fig. 127. — Chaloupe à vapeur de la *New-York steam power Company.*

devenus légers et gracieux, d'une rapidité remarquable; leurs machines, perfectionnées et simplifiées, consomment peu et sont très faciles à conduire. Ces bateaux ont des coques très solides, d'un dessin soigné, des chaudières légères et résistantes, produisant beaucoup de vapeur

sèche avec très peu de combustible, des machines d'un faible poids, à grande vitesse, fonctionnant sans secousses et utilisant la vapeur très économiquement.

La figure 128 représente la machine construite par une maison de New-York pour un bateau de ce genre.



Fig. 128. — Machine de chaloupe.

C'est le plus petit modèle qu'on trouve dans le commerce. Le cylindre n'a que 3 pouces de diamètre et le piston 5 pouces de course. Elle met en mouvement une hélice dont le diamètre est de 26 pouces et le pas de 3 pieds. La puissance maximum de la machine égale quatre ou cinq fois sa force nominale. La chaudière est de la forme indiquée pour les machines mi-fixes et la surface de

chauffe, dans le cas ci-dessus, est de 75 pieds carrés. Le bateau lui-même est semblable à celui de la figure 152; il a 25 pieds de long, 5 pieds 8 pouces de large et son tirant d'eau est de 2 1/4 pieds. Ces petites machines pèsent environ 150 livres par cheval nominal et les chaudières à peu près 300.

Quelques-uns de ces minuscules bâtiments ont réalisé des vitesses étonnantes. Un yacht à vapeur anglais, la *Miranda,* de 45 1/2 pieds de long, 5 3/4 de large et tirant 2 1/2 pieds d'eau, avec un poids total de 3 3/4 tonnes, atteignit une vitesse de près de 18 1/2 milles à l'heure pour de petits trajets. Il était mû par une machine dont le cylindre avait 6 pouces de diamètre et le piston 8 pouces de course, qui faisait faire 600 révolutions par minute à une hélice à deux branches de 2 1/2 pieds de diamètre et de 3 1/3 pieds de pas. La machine tout entière pesait 2 tonnes. Un autre yacht anglais, la *Firefly,* a même fait, dit-on, 18,94 milles en une heure. Un petit yacht français, l'*Hirondelle,* a pu atteindre une vitesse de 16 nœuds, correspondant à environ 18 1/2 milles par heure. C'était toutefois un bâtiment beaucoup plus grand que le précédent. Un des plus remarquables de ces petits steamers est un bateau-torpille, construit pour la marine des États-Unis. Il a 60 pieds de long, 6 pieds de large et 5 pieds de profondeur; son hélice est à deux branches, elle a 38 pouces de diamètre et 5 pieds de pas; mue par une machine et une chaudière légères, elle fait 400 tours par minute; le bateau atteint une vitesse de 19 à 20 milles par heure. Un autre petit navire, la *Vision,* marchait presque aussi vite, sous l'impulsion d'une machine qui développait une force de 20 chevaux, quoiqu'elle ne pesât, avec sa chaudière, qu'environ 400 livres.

Les yachts à grande vitesse exigent des machines d'un tel poids et d'un tel volume, qu'il ne reste guère de place pour les cabines, de sorte que ce sont des bâtiments très peu confortables. Dans la *Miranda,* le poids des organes moteurs représente plus de la moitié du poids total. Le *Day-Dream* est un spécimen de yacht de plaisance plus confortable et plus généralement recherché. Sa longueur est

de 105 pieds et il tire 5 1/2 pieds d'eau. Il a deux machines dont les cylindres ont 14 pouces de diamètre et autant de course de piston; elles sont à connexion directe, à condensation, et actionnent une hélice de 7 pieds de diamètre et de 10 1/2 pieds de pas, qui fait 135 tours par minute et donne au yacht une vitesse de 13 1/2 nœuds à l'heure.

Dans les grands bâtiments, la machine à hélice ordinaire

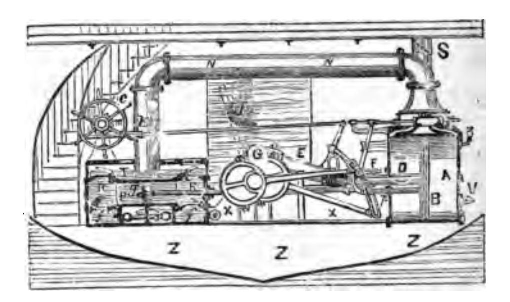


Fig. 129. — Machine marine à hélice horizontale à connexion directe.

est presque toujours, comme dans les yachts, à connexion directe. Deux machines sont placées côte à côte actionnant des manivelles rectangulaires. Dans les navires marchands, les cylindres sont habituellement verticaux et placés au-dessus des manivelles, commandées directement par les pistons. Le condenseur se trouve en arrière du bâti de la machine, ou bien, lorsqu'on emploie la condensation par injection, ce bâti lui-même est quelquefois creux et sert de condenseur. La pompe à air est manœuvrée par un balancier que des bielles relient à la crosse du piston. La disposition générale se voit dans les figures 130 et 131 ci-après.

Pour la marine militaire, ce système serait mauvais; car sa hauteur est si grande qu'il serait fort exposé aux coups de l'artillerie. On place alors le cylindre horizontalement, comme dans la figure 129, qui représente en coupe une machine à hélice marine horizontale à connexion directe, avec condenseur à injection et pompes à air à double effet. A est le cylindre, B le piston relié à la mani-

velle par la tige D et la bielle EF est le guide de la crosse du piston. Les excentriques G manœuvrent, au moyen d'une coulisse de Stephenson, le tiroir en coquille. Le changement de marche s'effectue au moyen du volant à main C, qui, par l'intermédiaire d'un engrenage *m* et d'une crémaillère *k*, élève ou abaisse la coulisse et renverse ainsi la marche du tiroir.

La machine à fourreau est d'un usage fréquent dans la marine anglaise; la bielle est attachée directement au piston et oscille à l'intérieur d'un fourreau cylindrique, solidaire du piston et qui sort du cylindre à vapeur comme une immense tige de piston creux. Cette machine est peu usitée aux États-Unis.

Dans presque tous les steamers construits récemment pour le service de la marine marchande, et dans quelques navires de guerre, le système *Compound* a été appliqué. Les figures 130 et 131 représentent la forme qu'on lui donne habituellement. AA est le petit cylindre, à haute pression; BB le grand cylindre, à basse pression. CC sont les boîtes de distribution. GG est le condenseur, qui est toujours par surface. Tantôt l'eau destinée à produire la condensation passe à l'intérieur des tubes disposés dans l'enveloppe G, tandis que la vapeur d'échappement circule autour de ces mêmes tubes; tantôt c'est au contraire la vapeur qui vient se condenser à l'intérieur des tubes, et l'eau froide qui les enveloppe. Dans les deux cas, ces tubes sont généralement de petit diamètre variant de 5/8 à 1/2 pouce; leur longueur est de 4 à 7 pieds. L'étendue de la surface réfrigérante varie d'ordinaire entre la moitié et les trois quarts de la surface de chauffe des chaudières.

La pompe à air et la pompe de circulation sont à la partie inférieure du condenseur, et actionnées par une manivelle placée sur l'arbre principal en N; ou bien quelquefois elles sont disposées comme dans le système de machine précédemment décrit, et mues par un balancier mis lui-même en mouvement par la crosse du piston. Les tiges de piston ST sont guidées par les crosses VV, maintenues par des glissières, et auxquelles sont articulées les bielles XX, qui

commandent les manivelles MM. Ces manivelles sont disposées habituellement à angle droit; parfois leur angle est porté jusqu'à 120° ou même 180°. Lorsque la machine est disposée comme dans la figure, un réservoir intermédiaire PO est placé entre les deux cylindres pour atténuer

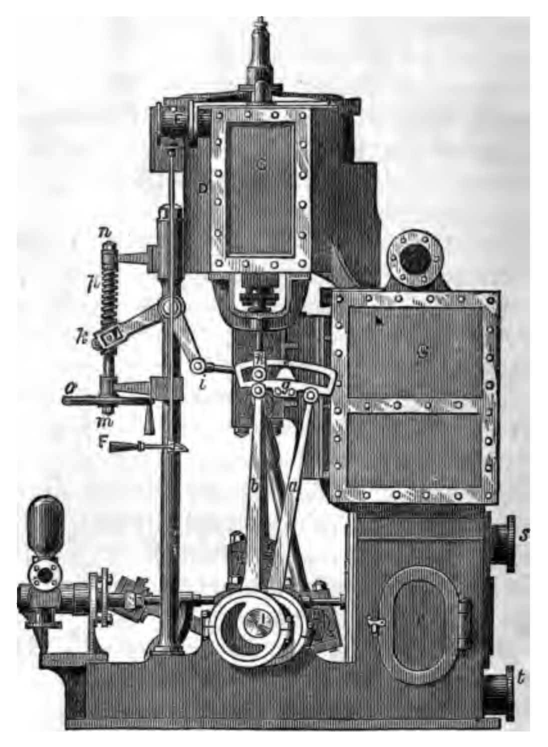


Fig. 130. — Machine marine *compound à pilon*. — Élévation latérale.

les variations de pression résultant des différences de vitesse des deux pistons. En sortant de la chaudière, le fluide moteur entre dans la boîte à vapeur x du cylindre à haute pression et est admis, comme à l'ordinaire, alternativement au-dessus et au-dessous du piston. Après avoir agi, la vapeur est conduite par la lumière d'échappement dans le réservoir P, où elle est délivrée au cylindre à basse pres-

sion, de la même manière que la chaudière délivre la vapeur au petit cylindre. En sortant du second cylindre, la vapeur se rend au condenseur.

L'appareil distributeur est habituellement une coulisse de Stephenson *ge*, dont la position est commandée et le

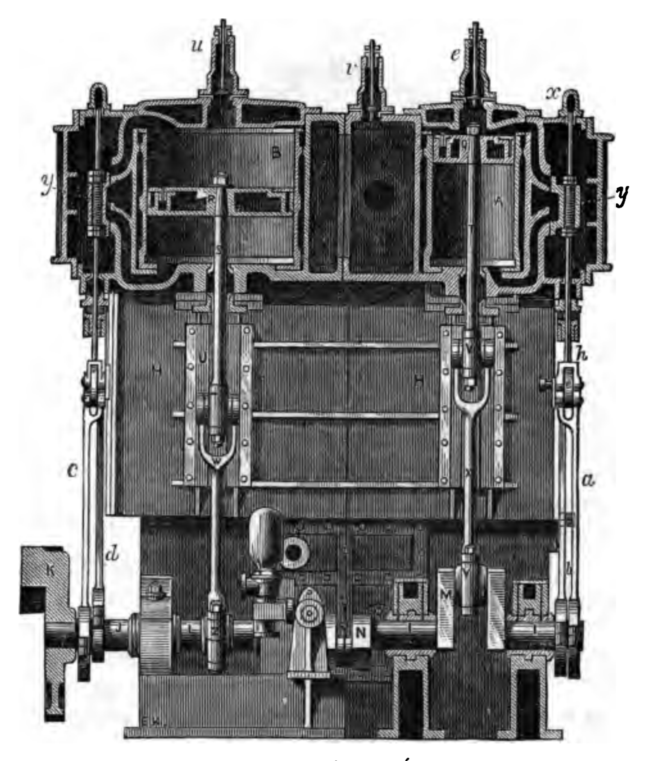


Fig. 131. — Machine marine *compound à pilon*. Élévation de face et coupe.

renversement obtenu par un volant à main *o* et une vis *mnp* reliée à la coulisse par le levier coudé *ki*. La bâche qui reçoit l'eau condensée forme aussi réservoir d'eau chaude. Le condenseur par surface est épuisé par une pompe à air à simple effet, placée intérieurement en *t*. La pompe alimentaire et celles de la cale sont commandées par la tige du piston de la pompe à air.

Le succès de la machine à deux cylindres fut définitivement assuré par les efforts de quelques ingénieurs, à la fois assez intelligents pour en comprendre les avantages, assez énergiques et entreprenants pour la faire valoir malgré une opposition très vive, assez puissants enfin, comme fortune et comme influence, pour réussir. Le plus



Fig. 132. — John Elder.

actif et le plus remarquable de ces hommes éminents fut John Elder, de la maison Randolph, Elder et Cie, plus tard John Elder et Cie, de Glasgow [1].

Elder était d'origine écossaise. Ses ancêtres avaient, pendant plusieurs générations, fait preuve de talent et d'habileté dans les arts mécaniques et avaient toujours eu la réputation d'excellents mécaniciens. John Elder naquit à Glasgow le 8 mars 1824, et mourut à Londres le

1. Voir *Memoir of John Elder*. W.-J.-M. Rankine, Glasgow, 1871.

17 septembre 1869. Il fit son éducation à l'école supérieure de Glasgow et au collège des ingénieurs à l'Université de cette ville; toutefois il n'en suivit pas longtemps les cours. Il apprit le métier, sous la direction de son père, dans les ateliers de MM. Napier et devint un dessinateur d'un talent hors ligne. Après avoir passé trois ans dans cet emploi à l'usine de Robert Napier, où son père avait été directeur, Elder devint, en 1852, un des associés de la maison, qui précédemment était connue sous la raison sociale de Randolph, Elliott et Cie. Cette maison commença à construire des navires en fer en 1860.

Dans l'intervalle, les expériences de Hornblower et de Wolff, d'Allaire et de Smith, de Mac-Naught, Craddock et Nicholson, ainsi que les études théoriques de Thompson, Rankine, Clausius et autres, avaient montré clairement de quel côté on devait chercher à améliorer les types alors en usage et quelle direction la pratique conduisait à suivre. Les conséquences qui en ressortaient furent reconnues de très bonne heure par Elder, et il commença bientôt à appliquer les principes dont sa connaissance de la thermodynamique et de la mécanique lui permettait d'apprécier la valeur. Il adopta la machine *compound* et disposa ses manivelles sous un angle de 180°, afin d'éviter les pertes dues au frottement de l'arbre dans ses coussinets, en équilibrant partiellement les efforts qu'ils ont à supporter. Elder fut l'un des premiers à signaler ce fait, que la machine *compound*, ne surpassait en rendement celle à cylindre unique, que dans les cas où la pression de la vapeur et le degré de détente sortaient des limites alors adoptées. Dès le début, ses essais furent heureux; et, depuis 1853 jusqu'à 1867, ses associés et lui furent continuellement occupés à construire des steamers et à les munir de machines *Compound*.

Dès 1854, les machines de leur premier bâtiment, le *Brandon*, ne consommaient que 3 1/4 livres de charbon par heure et par cheval, à une époque où la consommation était ordinairement d'un tiers plus forte. Cinq ans plus tard, ils construisaient des machines qui consommaient

encore un tiers de moins que celles du *Brandon;* et depuis lors, pendant bien des années, leurs machines, au moins celles de grande dimension, donnèrent des résultats économiques considérés comme fort remarquables : une consommation de 2 1/4 à 2 1/2 livres seulement.

En 1865, le gouvernement anglais ordonna l'essai comparatif de trois bâtiments de guerre qui ne différaient que par les dispositions de leurs machines. L'*Arethusa* avait des machines à fourreau du système ordinaire; l'*Octavia* avait trois cylindres à vapeur agissant sur trois manivelles faisant entre elles des angles de 120°; la *Constance*, était munie de machines *compound*, formant deux groupes de trois cylindres chacun; la vapeur se rendait de la chaudière dans le premier cylindre de chaque groupe, puis passait à travers les deux autres, où elle se détendait progressivement, et enfin se rendait du troisième cylindre dans le condenseur. Ces trois navires, pendant une semaine passée à la mer sous vapeur, brûlèrent en moyenne respectivement : 3 livres 64, 3 livres 17, et 2 livres 51 de charbon par heure et par cheval; et en outre, au point de vue des pertes par frottement, la machine de la *Constance* fit preuve d'une supériorité marquée.

Le passage de la machine à cylindre unique, avec balancier latéral, condenseur à injection et roues à aubes, à la machine *compound*, à connexion directe avec condenseur par surface et propulseur à hélice, s'est effectué de notre temps et sous les yeux d'ingénieurs aujourd'hui encore jeunes, et il faut considérer que cette transformation n'est pas encore complète. Ce changement dans la disposition de la machine n'a pas été aussi grand qu'on pourrait le croire. Les constructeurs ont été lents à se pénétrer des principes qui président à la détente dans un ou plusieurs cylindres; dans les premières machines, les deux cylindres à haute et basse pression agissaient sur la même bielle et chaque machine se composait de quatre cylindres. On finit par constater qu'on pouvait obtenir d'aussi bons résultats avec une machine à haute pression à cylindre unique, envoyant sa vapeur dans une autre plus grande à basse pression, fonc-

tionnant à part; et la machine *compound* devint dès lors aussi simple que le type qu'elle remplaçait. Cette indépendance des deux machines à haute et basse pression n'est pas du reste en elle-même quelque chose de nouveau; car le système consistant à employer la vapeur d'échappement d'une machine à haute pression pour en faire marcher une autre à pression moindre et à condensation, fut précisément l'une des premières combinaisons imaginées.

L'avantage des machines à deux cylindres est beaucoup plus grand sur mer que sur terre. Non seulement le charbon transporté par un navire à vapeur représente par lui-même une forte dépense; mais, comme il prend encore la place d'un poids ou d'un volume égal de fret, il faut ajouter à son prix la réduction qu'il entraîne dans la cargaison payante; de sorte que sa valeur primitive s'augmente de la somme représentant ses frais de transport. Aussi choisit-on le meilleur charbon possible pour les steamers qui font de longues traversées; on comprend tout de suite, et les propriétaires de ces bâtiments l'apprécient parfaitement, la nécessité d'avoir les machines les plus économiques. Ainsi une simple économie d'un quart de livre par cheval et par heure représente, sur un grand steamer transatlantique, un total d'environ 100 tonnes de charbon brûlées en moins pour un seul voyage. A quoi il faut ajouter le bénéfice fait sur les gages et la nourriture des hommes qu'il eût fallu pour manier cette masse de charbon, et enfin l'avantage de pouvoir transporter 100 tonnes de fret en plus.

Les changements que nous venons d'esquisser dans la forme des machines et le mode d'utilisation de la détente, furent retardés pendant bien des années par l'insuffisance des méthodes de construction. Le perfectionnement graduel de ces procédés a permis de produire et d'employer la vapeur à des pressions plus élevées; et l'on a continué de marcher avec assurance dans cette voie jusqu'à l'époque actuelle, pour tous les types de machines à vapeur. A la mer, l'usage des pressions élevées fut longtemps retardé par une difficulté sérieuse : la tendance du sulfate de chaux à se déposer dans les chaudières. Dès que la pression atteignait

25 livres au pouce carré, on constatait qu'aucun système n'empêchait le dépôt d'incrustations abondantes de ce sel; tandis qu'aux basses pressions primitivement employées sur mer il ne se formait aucun précipité gênant et la seule précaution nécessaire était l'évacuation d'une quantité suffisante d'eau salée, pour empêcher le sel marin de se déposer par l'effet de la saturation. On essaya bientôt de remédier à ce mal en se servant de la condensation par surface; mais longtemps encore on dut se demander si les inconvénients qu'elle présente n'étaient pas plus grands que ses avantages. Le défaut d"étanchéité des condenseurs donnait lieu à de très grandes difficultés; et les chaudières se trouvaient détériorées par une sorte de corrosion particulière, évidemment due à l'action du condenseur par surface. Enfin, on imagina un expédient fort simple : en laissant se former une croûte très mince dans la chaudière, on fit disparaître cet inconvénient; et depuis lors le plus grand obstacle à l'adoption générale des nouvelles machines fut l'esprit conservateur des ingénieurs de la marine, auxquels toute innovation paraissait suspecte. Une autre difficulté fut celle de trouver des mécaniciens qui ne fussent ni trop paresseux ni trop ignorants pour prendre soin du nouveau condenseur, plus compliqué, plus délicat, et qui exigeait une surveillance plus intelligente. Une fois le condenseur par surface admis, rien ne s'opposait plus à une élévation des pressions, et bientôt elles montèrent de 20 à 60 livres par pouce carré. Elder et ses rivaux des bords de la Clyde furent les premiers à mettre à profit les hautes pressions dès qu'elles devinrent praticables.

La légèreté de machine et le faible poids de chaudière, que procure le système *compound*, sont des qualités précieuses; de plus aucune autre combinaison satisfaisante ne permet d'obtenir en mer une grande détente et l'économie de combustible qui en est la conséquence; ces avantages sont tels que ce type de machine s'impose, pour ainsi dire, pour la propulsion des vaisseaux.

L'extrême légèreté de ces machines provient aussi, pour une grande part, du soin et de l'intelligence qui président

à l'établissement des plans ainsi qu'à la construction de tous les organes, au choix et à l'emploi des matières premières. Jusqu'à l'introduction des derniers types de bâtiments de guerre, les constructions anglaises s'étaient plutôt fait remarquer par le poids de leurs machines que par le calcul et les bonnes proportions des organes. Maintenant les moteurs des lourds cuirassés sont des modèles dignes d'étude, tant pour l'excellence des proportions et des matériaux employés que pour la perfection de la main-d'œuvre. De 400 à 500 livres par cheval indiqué, le poids s'est abaissé de plus de moitié pendant ces dix dernières années. On est arrivé à ce résultat en forçant les chaudières, un peu, il est vrai, aux dépens de l'économie, en élevant la pression, en augmentant beaucoup la vitesse du piston, en réduisant les frottements, en diminuant l'étendue des soutes à charbon et en réglant avec le plus grand soin les proportions de tous les organes. La réduction de volume des soutes est largement compensée par l'économie de vapeur qu'on a obtenue par la surchauffe, l'accroissement de la détente, l'augmentation de vitesse du piston et la condensation par surface.

Pour une bonne machine à vapeur marine, du type en usage il y a quinze ou vingt ans, avec des chaudières à basse pression de 25 à 30 livres par pouce carré au maximum, condenseur à injection et détente à moitié ou au tiers de la course, il fallait environ 30 à 35 livres de vapeur par cheval et par heure. L'adoption du condenseur par surface a fait descendre ce poids à 25 ou 30 livres; puis, en augmentant la pression jusqu'à 60 livres, en faisant commencer la détente du cinquième au huitième de la course, en combinant enfin les avantages spéciaux du surchauffeur et de la machine *compound* avec la condensation par surface, on a réduit la dépense de vapeur à 20 et même parfois à 15 livres par heure et par cheval. MM. Perkins de Londres s'engagent, comme nous l'avons déjà dit, à fournir des machines pouvant donner une force d'un cheval, en dépensant seulement 1 1/4 livre (568 grammes) de charbon par heure. C.-E. Emery

assure que le steamer *le Hassler* des États-Unis, dont il est l'auteur, a fait preuve, dans son service ordinaire, de qualités de marche qui probablement peuvent rivaliser avec tout ce qu'on a déjà obtenu. Le *Hassler* est un petit bâtiment de 151 pieds de long, 24 1/2 de large et 10 pieds de tirant d'eau. Les machines ont des cylindres dont les diamètres sont respectivement de 18,1 pouces et 28 pouces, avec une course commune de 28 pouces; la puissance est de 125 chevaux indiqués. Avec de la vapeur à 75 livres de pression et une vitesse de 7 nœuds seulement la quantité de charbon brûlé n'était que de 1,87 livre par cheval et par heure.

La Commission de l'Amirauté anglaise pour les projets des vaisseaux de guerre s'exprime ainsi dans un de ses derniers rapports : « La capacité de transport des vaisseaux peut certainement être augmentée d'une manière sensible par l'adoption de machines *compounds* pour le service de Sa Majesté. L'usage en est devenu récemment général dans la marine marchande, et les témoignages relatifs à la grande économie de combustible qu'elles permettent de réaliser sont, pour nous, concluants et irrécusables. Nous prenons donc la liberté de recommander très sérieusement l'adoption de ces machines pour tous les bâtiments de guerre que l'on construira désormais, et leur application même à ceux déjà construits, partout où la chose pourra se faire avec économie et sans gêne pour le service. »

Les formes d'hélice sont très variées; mais les types en usage ne sont pas nombreux. Dans les bâtiments de guerre, on se sert fréquemment d'hélices à deux branches, afin de pouvoir, quand on marche à la voile, les sortir de l'eau et les hisser dans le puits d'arrière; ou bien les disposer avec les deux branches verticales et directement en arrière de l'étambot, afin que la résistance qu'elles opposent au mouvement du navire soit aussi faible que possible. Dans les autres bâtiments, et dans la plupart des vaisseaux de guerre de premier rang, on emploie des hélices à trois ou quatre branches.

Dans la forme habituelle d'hélice (fig. 133) les branches ont une largeur presque constante du moyeu à la circonférence, ou bien elles s'élargissent un peu à leurs extrémités, comme le montre, en l'exagérant, la figure 134. Cette figure représente la forme adoptée pour les remorqueurs : l'élargissement des branches à l'extrémité est plus en usage dans ce cas que pour les navires à grande vitesse.

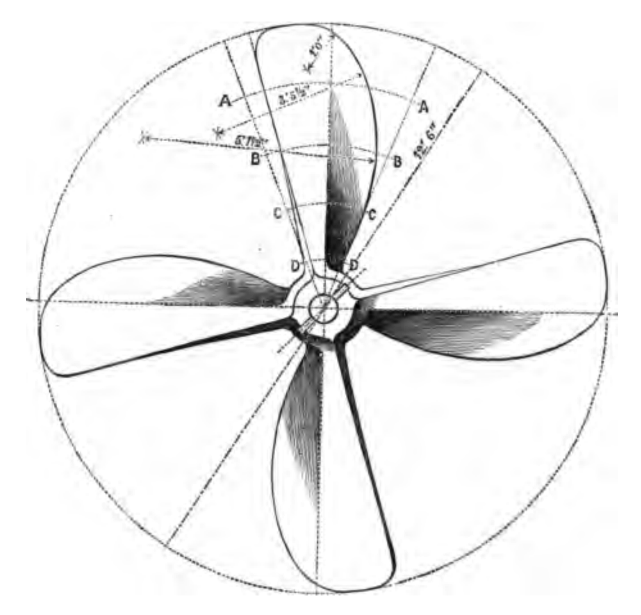


Fig. 133. — Hélice.

Dans l'hélice Griffith, qui est fort répandue, le moyeu est de forme sphérique et très gros. Les branches sont fixées par des tenons, et boulonnées de façon que leur position puisse être, au besoin, légèrement modifiée. Elles ont une forme qui rappelle la coupe d'une poire, la portion la plus large étant près du moyeu et se rétrécissant rapidement vers les extrémités. Une forme plus habituelle est celle de la figure 135, intermédiaire entre les deux précédentes. Le moyeu est assez gros pour qu'on puisse y fixer les branches

comme dans l'hélice Griffith, mais il se rapproche davantage de la forme cylindrique et les branches ont une largeur presque uniforme d'un bout à l'autre.

Le pas d'une hélice est la distance qu'elle parcourrait en un seul tour si elle se mouvait dans l'eau sans recul; c'est donc le double de la distance CD (fig. 134). CD' représente la trajectoire hélicoïdale suivie par l'extrémité de la branche B, et OEFHK est celle de la branche A. Le rapport du diamètre au pas de l'hélice est déterminé par la

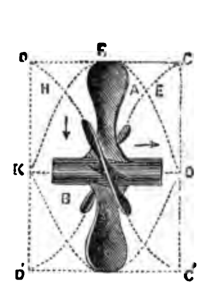


Fig. 134. — Hélice de remorqueur.

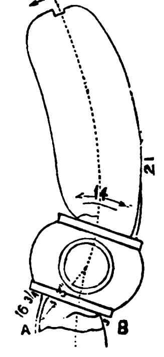


Fig. 135. — Hélice de Hirsch.

vitesse qu'on veut donner au bâtiment. Pour une faible vitesse, le pas peut être réduit aux 5/4 du diamètre. Il en est souvent le double pour les navires à grande vitesse. Le diamètre de l'hélice doit être aussi grand que possible, puisque le recul diminue quand augmente la surface du cercle enveloppe. La longueur d'une hélice est habituellement un sixième environ de son diamètre. Une hélice plus longue entraîne des pertes de force, par suite de l'augmentation de la surface de frottement contre l'eau; une hélice trop courte n'utilise pas complètement la résistance du cylindre d'eau dans lequel elle joue, il en résulte du recul et par suite une perte de travail. La formule empirique suivante, généralement assez exacte, permet d'évaluer le recul probable dans un navire bien dessiné.

S étant le glissement en centièmes du chemin parcouru, M la surface immergée du maître couple, A l'aire du cercle enveloppe de l'hélice, on a :

$$S = 4\frac{M}{A}.$$

Les meilleures hélices ont le pas un peu plus grand à la circonférence qu'au moyeu, et croissant de l'avant à l'arrière. Le plus généralement on se contente de faire varier le pas de cette dernière manière. La poussée de l'hélice est la pression qu'elle exerce en chassant le vaisseau en avant. Dans les navires bien dessinés, munis de bonnes hélices, on utilise pour la propulsion les deux tiers environ de la puissance appliquée à celles-ci, le reste étant perdu par l'effet du recul et des résistances passives. Le rendement est donc dans ce cas de 66 pour 100. Dans les bâtiments de faible tirant d'eau et de grande largeur, on fait parfois usage d'hélices jumelles, ce qui diminue le recul.

Comme nous l'avons déjà dit, la machine *compound* a été essayée par plusieurs ingénieurs américains, mais avec moins de bonheur qu'en Europe.

Un système tout à fait spécial de propulsion, employé avec succès dans quelques cas, est le touage sur câble en fil de fer noyé. Il ne convient que pour un bateau parcourant constamment le même trajet, allant et venant entre deux points, et que rien n'oblige à s'écarter notablement de la route assignée. Ce système est en usage au Canada, mais il ne s'est pas encore généralisé aux États-Unis; et pourtant, partout où il est praticable, il a une supériorité économique marquée. Avec la traction sur chaîne ou sur câble, il n'y a pas de perte de travail résultant du recul ou des pressions obliques. Avec les roues ou les hélices, ces pertes constituent une fraction importante de la puissance totale, fraction qui ne descend guère au-dessous de 0,25, et, pour des remorqueurs, dépasse peut-être 0,50. L'objection qu'on fait souvent au touage sur chaîne est l'obligation qu'il entraîne de suivre exactement la ligne le long de laquelle cette chaîne est posée. Il est toutefois bien

moins difficile qu'on ne le croirait de suivre une route sinueuse et d'éviter les obstacles ou les bateaux qu'on peut rencontrer. Ce système convient particulièrement sur les canaux.

Les chaudières employées dans les meilleures et les plus récentes machines marines sont de formes très variées; mais, les types d'un usage général sont peu nombreux. Celui dont on se sert sur les steamers fluviaux des États-Unis a déjà été décrit.

La figure 136 est un type de chaudière marine tubu-

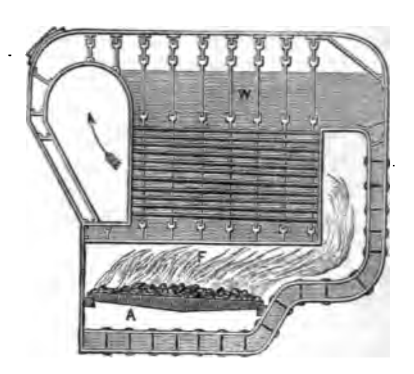


Fig. 136. — Chaudière marine tubulaire. Coupe.

laire, très usité pour les vapeurs de haute mer à pression modérée et spécialement pour les bâtiments de guerre. Les gaz vont directement du foyer dans le compartiment postérieur, d'où ils reviennent par des tubes horizontaux à la boîte à fumée et à la cheminée. Dans les vaisseaux de guerre, comme il est nécessaire de tenir toutes les parties de la chaudière le plus bas possible au-dessous de la ligne de flottaison, on supprime le tuyau ordinaire de prise de vapeur. Il est remplacé par des conduites qui courent à l'intérieur, d'une extrémité à l'autre de la partie supérieure de la chaudière, et où la vapeur pénètre par une série de petits trous percés sur leur génératrice supérieure. La vapeur ainsi recueillie est humide, mais la quantité de liquide qu'elle entraîne n'est généralement pas considérable.

Dans la marine des États-Unis, on fait de plus en plus usage d'une chaudière de la disposition suivante : les gaz venant du compartiment postérieur sont amenés à traverser une boîte tubulaire et à parcourir un faisceau de tubes verticaux remplis d'eau, par lesquels la circulation s'opère librement entre les deux masses liquides situées l'une au-dessus du ciel du foyer, l'autre au-dessus de ces tuyaux eux-mêmes. Ces chaudières à « tubes à eau » ont sur celles à « tubes à feu », déjà décrites, un léger avantage comme faible volume, quantité de vapeur produite et économie de combustible; il est facile de gratter ces tubes pour les dé-

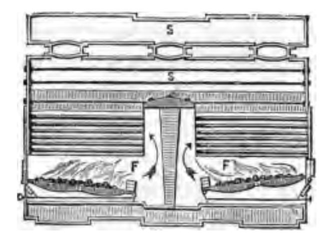


Fig. 137. — Chaudière marine à haute pression. Coupe.

barrasser des dépôts, lorsqu'une croûte de sulfate de chaux ou d'autre sel s'est formée sur leurs parois intérieures. La chaudière à tubes à feu a, d'autre part, l'avantage de permettre de boucher les tubes qui fuient, et celui d'être bien moins coûteuse. Les chaudières à tubes à eau n'en sont pas moins de plus en plus usitées sur les steamers des États-Unis. Elles sont peu en faveur dans la marine marchande, quoiqu'elles aient été introduites aux États-Unis par James Montgomery et, vingt ans auparavant, en Angleterre, par lord Dundonald. Les ingénieurs sont encore très divisés d'opinions sur ce sujet. Elles reprennent peu à peu le dessus sous la forme de chaudières à compartiments.

Aujourd'hui on donne habituellement aux chaudières marines la forme que montre en coupe la figure 137, et qui est adoptée dans tous les cas où l'on fait usage de pressions égales ou supérieures à 60 livres par pouce carré, par exemple dans les bâtiments munis de machines *compound*, les

formes cylindriques étant considérées comme celles qui conviennent le mieux aux grandes pressions. Les foyers sont constitués par de gros carneaux cylindriques. Les gaz s'élèvent, comme le montre la figure, par un compartiment central, puis retournent à travers les tubes aux extrémités de la chaudière, d'où, au lieu d'entrer directement dans la cheminée, ils sont conduits, par un collecteur, qu'on ne voit pas dans le dessin, au cône ou culotte. Dans les steamers marchands, on voit souvent un réservoir à vapeur disposé horizontalement au-dessus de la chaudière. D'autres fois, un séparateur est adapté au tuyau de prise de vapeur, entre la chaudière et la machine. Il consiste habituellement en un réservoir en fer divisé par une cloison verticale qui, partant du sommet, descend presque jusqu'au fond. La vapeur, entrant par le haut, d'un côté de cette cloison, passe au-dessous d'elle et remonte du côté opposé, d'où elle se rend dans le tuyau qui la conduit directement à la machine. Le brusque changement de marche qu'elle subit ainsi lui fait abandonner l'eau qu'elle tient en suspension et qui tombe dans le fond du séparateur, d'où elle est enlevée par des tuyaux de décharge.

Les spécimens les plus intéressants de l'architecture navale et des machines marines modernes se voient dans les steamers qui circulent sur les grandes lignes de l'Océan pour les services commerciaux; en ce qui concerne la marine de guerre, il faut en chercher les types dans les énormes cuirassés construits en Angleterre.

La *City of Peking* est un des plus beaux exemples de construction américaine. Ce bâtiment, appartenant à la *Pacific mail Company*, a 423 pieds de long, 48 pieds de large et 38 1/2 de creux. Il est disposé pour 150 passagers de chambre et 1,800 d'entre-pont; ses soutes peuvent emmagasiner 1,500 tonnes de charbon. Les tôles de fer employées à la construction de la coque ont une épaisseur variant de 11/16 de pouce à un pouce. Il est entré dans sa construction environ 5,500,000 livres de fer. Les machines avec les accessoires et pièces de rechange

pèsent près de 2 millions de livres. Elles sont du système *compound*, avec deux cylindres de 51 pouces et deux de 88 pouces de diamètre, la course des pistons étant de 4 1/2 pieds. L'eau nécessaire à la condensation est envoyée dans les condenseurs par surface par des pompes de circulation que font mouvoir des machines spéciales. La vapeur est fournie par dix chaudières de 13 pieds de diamètre et 13 1/2 pieds de longueur, avec une épaisseur de métal de 13/16 de pouce. Chaque chaudière a 3 foyers et contient 204 tubes de 3 1/4 pouces de diamètre extérieur. Ensemble, elles présentent 520 pieds carrés de surface de grille et 17,000 de surface de chauffe. La surface réfrigérante des condenseurs atteint 10,000 pieds carrés. Ces machines sont calculées pour développer une force de 4,000 chevaux à la vitesse de 50 révolutions par minute, avec de la vapeur à 60 livres de pression, qui se détend jusqu'à 10 livres avant de se rendre au condenseur. L'hélice a été déjà représentée (fig. 135). Elle est à quatre branches de 20 1/2 pieds de diamètre avec un pas de 30 pieds. Ce steamer a fait 15,8 nœuds à l'heure, ce qui correspond à 19 milles ($30^{k},400$); il brûle de 40 à 80 tonnes de charbon par jour, suivant la vitesse et l'état du temps.

Les meilleurs bâtiments à vapeur en service de nos jours, sont ces steamers à hélice des lignes transocéaniques. Les transatlantiques ont habituellement de 350 à 450 pieds de long, et font généralement de 12 à 15 nœuds à l'heure; leurs machines développent une puissance de 3,000 à 4,000 chevaux et ils traversent l'Atlantique en huit à dix jours. Ils sont maintenant tous munis de machines *compound* et de condenseurs par surface. L'un d'eux, le *Germanic*, a été signalé en vue de Sandy-Hook, à l'entrée du port de New-York, 7 jours 11 heures et 37 minutes après avoir quitté Queenstown, ayant parcouru une distance qui, mesurée par le loch et l'observation, était de 2,830 milles. Un autre steamer, le *Britannic*, a traversé l'Atlantique en 7 jours 10 heures 53 minutes. Ces bâtiments jaugent 5,000 tonneaux, et leur force nominale de 750 chevaux correspond peut-être à 5,000 chevaux effectifs.

Le steamer moderne est aussi merveilleux par l'ingénieuse disposition de ses aménagements intérieurs que par ses dimensions, sa puissance et sa vitesse. Les steamers de haute mer sont devenus tellement énormes, qu'il serait imprudent de laisser à la main de l'homme le soin d'en lever l'ancre ou d'en manœuvrer le gouvernail. On a recours pour cela, comme pour le chargement et le déchargement du navire, à la même force motrice : la vapeur.

La machine auxiliaire maintenant en usage pour diriger le gouvernail fut imaginée vers 1850 par l'ingénieur américain F.-E. Sickels, l'inventeur du système de détente qui porte son nom; elle figurait à l'Exposition internationale de Londres en 1851. Elle consiste[1] essentiellement en deux cylindres à vapeur agissant à angle droit sur un arbre qui engrène à l'intérieur d'une grande roue, rendue solidaire de la mèche du gouvernail par une plaque de friction garnie de bois, qui peut être serrée plus ou moins au moyen d'une vis de pression. La roue que manœuvre le timonier est reliée avec la distribution des cylindres, de façon que la vapeur, ou un autre moteur, transmette au gouvernail des déplacements reproduisant exactement ceux imprimés par la main du timonier à la roue qui règle la position des tiroirs. Cette roue devient ainsi la véritable roue de manœuvre. Tout le système est habituellement disposé de manière qu'on puisse établir ou supprimer instantanément la connexion, pour pouvoir gouverner à la main si la douceur de la mer et la faible vitesse du navire le font juger convenable. Ce dispositif a été pour la première fois appliqué aux États-Unis sur le steamer *Augusta*.

Le même inventeur, et d'autres après lui, ont imaginé des cabestans à vapeur, dont quelques-uns sont fort en usage sur les grands bâtiments. Ces navires sont souvent aussi pourvus d'une machine à vapeur spéciale, chargée de commander le changement de marche, ce qui permet de les manœuvrer aussi facilement que les petits bâti-

1. *Official Catalogue*, 1862, t. IV, classe VIII, p. 123.

ments, sur lesquels ce mécanisme fonctionne toujours à la main. Dans une de ces petites machines auxiliaires, de l'invention de l'auteur, il suffit de placer sur un cadran une simple poignée dans une position déterminée, par exemple au point marqué *stop*, pour que la machine auxiliaire se mette de suite en marche, place l'appareil distributeur dans la position requise, au point mort s'il s'agit d'un système à coulisse, stope ainsi la grande machine, et s'arrête ensuite elle-même. Si l'on dirige au contraire la poignée de façon à ce que son index corresponde au signe *en avant*, la petite machine repart, dispose la coulisse de la façon voulue, met ainsi les grandes machines à la position de la marche en avant, et s'arrête encore. Si on la place enfin sur le signe *en arrière*, la même série d'opérations se reproduit, laissant finalement les machines principales en mouvement arrière et la petite aù repos. Il existe un grand nombre de dispositifs analogues adaptés aux divers types de machine motrice.

La coque du steamer transatlantique se fait maintenant toujours en fer ; elle est divisée en un certain nombre de compartiments étanches, séparés les uns des autres par des cloisons métalliques munies de portes, qui, une fois fermées, interdisent tout passage à l'eau. Quelquefois ces portes se ferment automatiquement quand l'eau pénètre dans le bâtiment et la retiennent ainsi dans le compartiment envahi.

Nous voyons quels changements ont été réalisés sur les lignes transocéaniques, depuis les steamers comme le *Great-Western* (1837), de 212 pieds de long, 35 1/2 de large et 23 pieds de profondeur, mû par des machines de 450 chevaux et qui mettait quinze jours à traverser l'Atlantique, jusqu'aux vapeurs actuels dont la longueur dépasse 450 pieds, la largeur 45, le creux 35, dont les machines ont une puissance de 5,000 chevaux et qui franchissent l'Atlantique en 7 1/2 jours. Nous avons vu le fer prendre la place du bois dans la coque, la dépense de combustible réduite de moitié, et la vitesse passer de 8 à 15 nœuds et davantage. Dans les premiers steamers, le rapport de la

longueur à la largeur était de 5 ou 6 à 1; en quarante ans, on est arrivé à la proportion de 10 ou 11 à 1.

Les changements récemment survenus dans les méthodes d'attaque et de défense ont considérablement modifié tout le matériel de guerre des divers pays; mais aujourd'hui tous les bâtiments qui constituent la marine militaire sont plus que jamais sous la dépendance de leurs machines à vapeur.

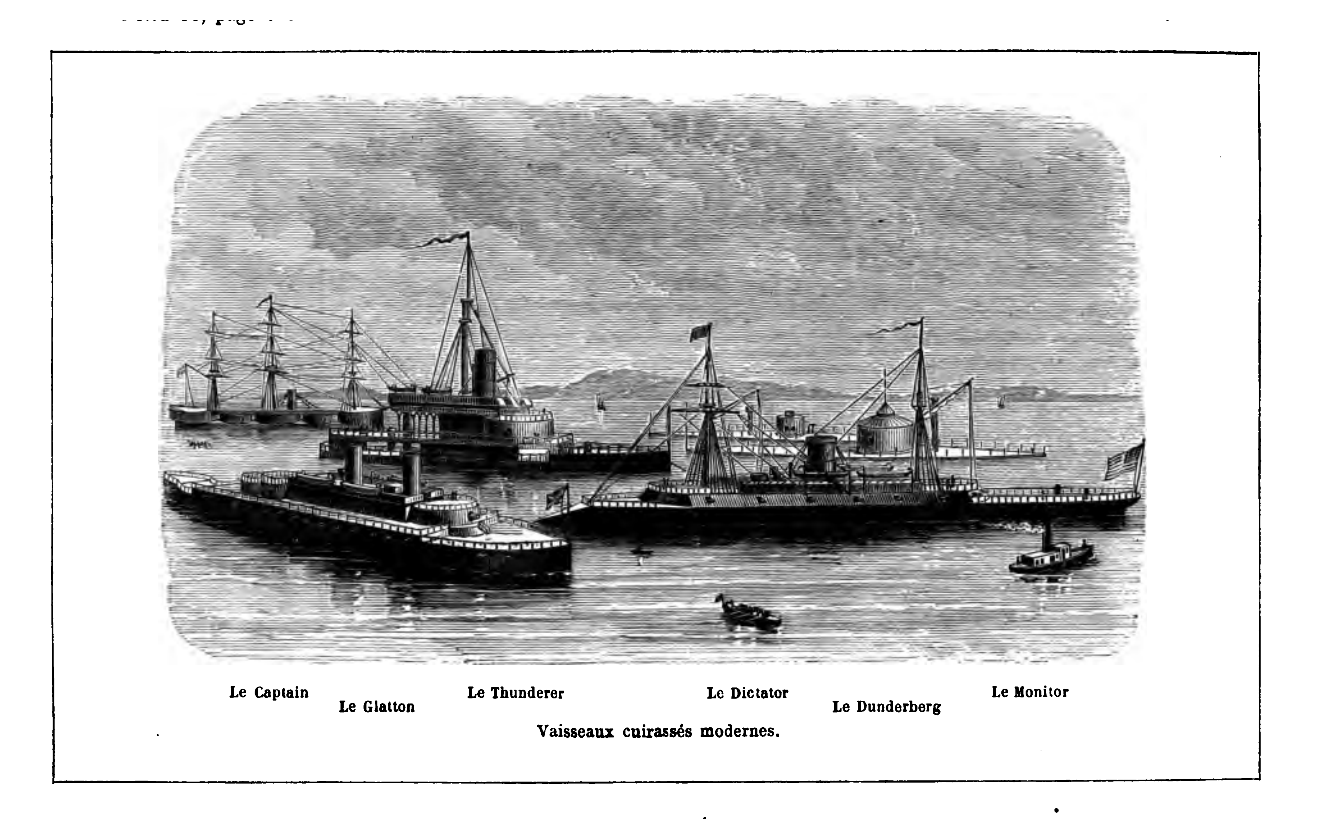
C'est seulement dans ces derniers temps qu'on semble avoir essayé de déterminer une classification des bâtiments de guerre, et d'organiser un ensemble susceptible de satisfaire pleinement à toutes les exigences d'un avenir prochain. Jusqu'ici on s'était contenté de faire chaque navire un peu plus fort, plus rapide ou plus puissant, dans la défense ou dans l'attaque, que son prédécesseur immédiat. La science de la construction et l'architecture navale progressent dans une direction déterminée, clairement indiquée aujourd'hui, et dont l'étude peut servir de base à celle des divers types de navires de guerre et à leur répartition en différentes catégories. Ce sont là des faits positifs dont on est loin en général d'apprécier l'importance.

En 1870, l'auteur a proposé[1] une classification des bâtiments, autres que les bateaux-torpilles, qui depuis a été présentée aussi, sous une forme quelque peu modifiée, par M. J. Scott Russell[2]. L'auteur observait alors que l'accroissement si rapide du poids de l'artillerie et de la cuirasse, comme de la vitesse de marche des vaisseaux de guerre, forcerait probablement bientôt à diviser les bâtiments de toutes les marines, non compris les bateaux-torpilles, en trois classes : une pour le service général en temps de paix, les autres seulement pour le temps de guerre.

« La première classe peut se composer de navires non cuirassés de dimension moyenne, bonne vitesse sous vapeur, armés de quelques canons assez lourds et munis d'une voilure complète.

1. *Journal of the Franklin Institute,* 1870. (Le vaisseau de Sa Majesté britannique : *Monarch.*)

2. Londres, *Engineering,* 1875.



Le Captain Le Glatton Le Thunderer Le Dictator Le Dunderberg Le Monitor

Vaisseaux cuirassés modernes.

Des trois classes ci-dessus, la dernière est la plus intéressante, et démontre d'une manière complète l'importance et la variété des travaux que l'on est arrivé à faire exécuter par la machine à vapeur. Dans les plus récents de ces navires, l'ancre est levée par un appareil à vapeur spécial; les vergues et voiles plus lourdes sont manœuvrées à l'aide d'un cabestan à vapeur; le gouvernail est commandé par une machine, que le timonier met en mouvement avec son petit doigt et qui agit sur la barre avec une puissance qui défie le vent et la mer, avec une précision que ne pourrait surpasser le gouvernail à main d'un yacht; les canons sont chargés par la vapeur; c'est elle qui les pointe en hauteur comme en direction; les tourelles qui renferment ces canons et ceux-ci avec elles font tout le tour de l'horizon en moins de temps qu'il n'en faut pour recharger les pièces, et le navire est poussé à travers les vagues par la force de 10,000 chevaux, avec une vitesse qui ne le cède qu'à celle des trains de chemins de fer.

Le *Minotaur* anglais fut un des premiers cuirassés. La grande longueur qu'avaient les vaisseaux de ce modèle, la difficulté de manœuvre qui en résultait, leur défaut de vitesse et la faiblesse de leur cuirasse ont conduit à l'établissement de types beaucoup plus puissants lors des constructions postérieures. Le *Minotaur* est un cuirassé à hélice à quatre mâts, de 400 pieds de long, 59 de large et 26 1/2 de tirant d'eau. Sa vitesse à la mer est d'environ 12 1/2 nœuds et ses machines développent, au maximum, une force indiquée de 6,000 chevaux. Ses plus fortes plaques n'ont que 6 pouces d'épaisseur. Son extrême longueur et son gouvernail non équilibré le rendent très lourd à la manœuvre. Avec 18 hommes à la roue du gouvernail et 60 autres aux palans, le bâtiment mit un jour 7 1/2 minutes pour une évolution complète.

A ces longs cuirassés succédèrent des bâtiments plus courts, établis par M. E.-J. Reed ; le premier, le *Bellerophon*, jauge 4,246 tonneaux, a 300 pieds de long, 56 de large, 24 1/2 de tirant d'eau et une vitesse de 14 nœuds pour une puissance de 4,600 chevaux. Grâce à son « gouver-

nail équilibré », employé bien des années auparavant aux États-Unis par Robert L. Stevens[1], il peut virer en 4 minutes avec 8 hommes à la roue. Ses frais de construction ont été moindres que ceux du *Minotaur*, d'environ 600,000 dollars.

Un vaisseau plus récent encore, le *Monarch*, a été construit sur un plan tout à fait semblable à celui connu aux États-Unis sous le nom de type *Monitor*, ou cuirassé à tourelles. Il a 330 pieds de long, 57 et demi de large et 36 de creux; il tire 24 1/2 pieds d'eau. Le déplacement dépasse 8,000 tonneaux, et la force des machines est de plus de 8,500 chevaux. La cuirasse a 6 et 7 pouces d'épaisseur sur la coque, 8 pouces sur les deux tourelles, en sus d'un épais matelas en bois de teak. Les tourelles contiennent chacune deux canons rayés de 12 pouces, pesant 25 tonnes chaque, et qui, avec une charge de 70 livres de poudre, communiquent à un projectile de 600 livres une vitesse de 1,200 pieds par seconde, lui donnant ainsi une force vive équivalente au soulèvement de plus de 6,100 tonnes à un pied de haut, et lui permettant de traverser une plaque de fer de 13 1/2 pouces d'épaisseur. Cet énorme vaisseau est mû par une paire de machines à *cylindre unique* de *10 pieds* de diamètre et de 4 1/2 pieds de course de piston. L'hélice, du système Griffith, est à deux branches; elle a un diamètre de 23 1/2 pieds et un pas de 26 1/2. Elle fait 65 révolutions par minute à la vitesse maximum de 14,9 nœuds à l'heure. Pour alimenter ces puissantes machines, il faut des chaudières d'environ 25,000 pieds carrés de surface de chauffe, avec 900 pieds carrés de surface de grille. La surface réfrigérante du condenseur a une étendue de 16,500 pieds carrés. Ces machines avec leurs chaudières ont coûté 66,500 livres sterling (1,662,500 fr.).

Marchant à toute puissance, ce navire, animé de sa vitesse maximum de 15 nœuds et lancé comme un bélier, frapperait un navire ennemi au repos avec l'épouvantable « énergie » de 48,000 tonnes-pieds, représentant un choc

1. Encore en usage sur les bacs de Hoboken.

égal à celui des projectiles de huit ou neuf canons, tels que ceux portés par le cuirassé lui-même, déchargés simultanément sur le même point.

Et pourtant cet immense bâtiment est encore moins formidable que ceux qui lui ont succédé. L'*Inflexible* est plus court, mais plus large et plus profond que le *Monarch;* il mesure 320 pieds de long, 75 pieds de large et cale 25 pieds d'eau; son déplacement est de 10,000 tonneaux. Les gros canons qu'il porte pèsent 81 tonnes chacun, ils sont abrités derrière des plaques de fer de 2 pieds d'épaisseur et lancent des projectiles d'une demi-tonne. Les machines ont à peu près la même force que celles du *Monarch* et donnent à cette coque colossale une vitesse de 14 nœuds à l'heure.

La marine des États-Unis ne possède pas de cuirassés d'une puissance approchant celle des types les plus élevés des diverses classes de la marine anglaise et des autres marines étrangères.

Le plus grand bâtiment qu'on ait encore construit est le *Great-Eastern* (pl. XVI), commencé en 1854 et terminé en 1859 par M. J. Scott Russell, sur la Tamise. Ce vaisseau a 680 pieds de long, 83 de large, 58 pieds de creux, il cale 28 pieds et jauge 24,000 tonneaux. Il a 4 machines à roues et 4 à hélice, les premières ayant des cylindres de 74 pouces de diamètre et 14 pieds de course, les autres des cylindres d'un diamètre de 84 pouces et d'une course de 4 pieds. Ensemble elles représentent une force totale de 10,000 chevaux. Les roues à aubes ont 56 pieds de diamètre, l'hélice 24 pieds. Les chaudières alimentant les machines des roues ont 44,000 pieds carrés (plus de 4,000 mètres carrés, près d'un demi-hectare) de surface de chauffe; les chaudières des machines de l'hélice sont encore plus grandes. Lorsqu'il cale 30 pieds d'eau, ce grand bâtiment déplace 27,000 tonnes. Les machines ont été calculées pour développer une force de 10,000 chevaux et imprimer une vitesse de 16 1/2 milles à l'heure.

Les chiffres que nous venons de citer ne permettraient pas à un lecteur qui n'est pas du métier de se faire

une idée nette de la puissance prodigieuse concentrée dans l'espace, relativement si faible, qu'occupe la machine d'un bâtiment. La « force d'un cheval », prise pour unité dans les machines, est celle déterminée par Watt comme représentant le travail maximum que pouvaient exercer, pendant huit heures par jour, les plus robustes chevaux de trait de Londres. C'est au moins moitié plus que ne pourrait faire en moyenne un cheval de trait de force ordinaire, pendant les huit heures d'une journée de travail. D'un autre côté, la journée de travail d'une machine dure vingt-quatre heures.

Il faudrait donc au moins 15,000 chevaux pour produire l'effort dont sont capables les machines de 10,000 chevaux du *Great-Eastern;* mais pour soutenir ce travail dans les mêmes conditions, sans interruption, jour et nuit, pendant des semaines entières, comme le fait la vapeur, il faudrait au moins trois équipes de chevaux se relayant successivement, soit 45,000 bêtes. Un tel haras pèserait 20,000 tonnes; et attelé en file, sa longueur dépasserait 30 milles. C'est par des comparaisons de ce genre que l'esprit peut arriver à comprendre l'impossibilité complète d'exécuter avec des animaux le travail qu'accomplit la vapeur en ce monde. Cette force considérable coûte environ dix fois moins que celle des chevaux, et grâce à elle on peut exécuter facilement un travail qu'il serait absolument impossible de demander à des moteurs animés.

La puissance totale des machines à vapeur existant à la surface du globe est évaluée à 15,000,000 de chevaux environ; et on estime que, pour exécuter le travail que ces machines sont capables de faire en travaillant constamment, il faudrait plus de 60,000,000 d'animaux.

Ainsi, des essais modestes du comte d'Auxiron et du marquis de Jouffroy en France, de Symmington en Angleterre, de Henry, Rumsey, Fitch, Fulton et Stevens aux États-Unis, est sorti un auxiliaire puissant de l'humanité, un bienfait d'un prix inestimable pour la société.

Aujourd'hui nous parcourons les mers avec moins de dangers, nous transportons au loin nos personnes et nos

biens en moins de temps et avec moins de dépenses qu'il n'en fallait à nos pères, au commencement du siècle, pour des traversées dix fois plus courtes.

C'est, pour une large part, à cette ingénieuse application d'une puissance qui rappelle celle des génies fabuleux des contes de l'Orient, que l'ouvrier et l'artisan modernes doivent ce bien-être et ce luxe, qui étaient inconnus aux puissants et même aux rois du siècle dernier.

La grandeur des steamers de nos jours fait l'étonnement et l'admiration de nos contemporains eux-mêmes; et l'art ne saurait à coup sûr imaginer de spectacle plus grandiose que celui d'un transatlantique de 150 yards de long, pesant avec son chargement 5 ou 6,000 tonnes, lorsqu'il prend le large, poussé par des machines dont la puissance équivaut aux forces réunies de plusieurs milliers de chevaux. Rien n'est plus capable de faire naître un sentiment de crainte respectueuse qu'un colosse immense comme les grands cuirassés d'aujourd'hui pesant de 8,000 à 10,000 tonnes, mus par des machines à vapeur de la force d'autant de chevaux, portant des canons dont le projectile traverse des masses de fer de 20 pouces d'épaisseur, et possédant, quand ils marchent à vitesse moyenne, une puissance de choc suffisante pour élever 35,000 tonnes à un pied de haut.

Bien plus énorme encore que le *Monarch* est ce monstre construit trop tôt, ce *Great-Eastern* (pl. XVI), long d'un huitième de mille, et dont les machines à vapeur font le travail d'un haras de 45,000 chevaux.

Ainsi nous voyons se réaliser littéralement les prédictions d'Olivier Evans et de John Stevens; à bientôt peut-être l'accomplissement de cette poétique prophétie, que chantait, il y a plus d'un siècle, le poète Darwin, alors que les inventions de Watt étaient à peine connues :

Bientôt nous te verrons, ô vapeur indomptée,
Pousser le lourd navire et le chariot poudreux,
Et, prenant vers le ciel ton vol audacieux,
Porter l'homme, ton maître, au sein de l'empyrée,

LIVRE VII

THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR. — HISTORIQUE. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

« De toutes les formes sous lesquelles se manifeste le progrès économique chez les nations civilisées, celle qui frappe le plus vivement, à cause de sa connexité intime avec les phénomènes de la production, c'est le développement incessant de la puissance de l'homme sur la nature, développement perpétuel, et qui semble devoir s'étendre au delà de toute limite assignable. Rien ne peut faire encore supposer que nous approchions du terme de nos conquêtes sur l'inconnu; jamais à aucune époque les notions acquises sur la matière et les lois physiques ne se sont étendues plus rapidement et dans plus de directions à la fois, et il nous arrive si fréquemment d'entrevoir des horizons inexplorés, que nous pouvons véritablement admettre que notre connaissance de la nature est encore dans l'enfance. » — MILL.

La théorie physique de la machine à vapeur a suivi un développement progressif, dont l'étude offre autant d'intérêt que celle des modifications successives réalisées dans les mécanismes.

Dans le fonctionnement de la machine à vapeur, on retrouve l'application de la plupart des notions et des principes les plus importants qui constituent les sciences physiques. On peut la considérer comme un appareil fort ingénieux, mais malheureusement très imparfait encore, pour transformer en énergie mécanique l'énergie calorique obtenue par la combinaison chimique d'un corps combustible avec l'agent universel de combustion. Pour retrouver la source primitive de toute cette énergie ou puissance, il faut remonter bien loin en arrière du moment où elle se manifeste dans la chaudière à vapeur, et se reporter aux origines mêmes de la nature.

Quand le système solaire se fut dégagé du chaos nébu-

leux de la création, la masse incandescente, que nous appelons aujourd'hui le soleil, constituait un vaste dépôt d'énergie calorique, qui de là, rayonnant à travers l'espace, se répandit par torrents, d'une abondance et d'une intensité infinies, sur les mondes escortant l'astre radieux. Dans les âges passés de la vie du globe, l'énergie calorique envoyée par le soleil sur la surface de la terre fut partiellement employée à produire des forêts immenses, en accumulant dans les troncs, les branches et les feuilles de leurs arbres d'énormes masses de carbone, qui précédemment existaient dans l'atmosphère, combinées avec l'oxygène, à l'état d'acide carbonique. Les grands bouleversements géologiques, qui vinrent enterrer ces forêts sous des couches superposées de terres et de roches, eurent pour résultat la formation de veines de houille, dans lesquelles s'emmagasina, pour une longue série de siècles, une prodigieuse quantité de carbone, dont l'affinité pour l'oxygène ne put se satisfaire, jusqu'à ce que la main de l'homme vînt le mettre au jour. Ainsi c'est à la chaleur et à la lumière du soleil, comme l'a fait observer George Stephenson, que nous devons cette incalculable réserve de force latente, si indispensable à l'existence de la race humaine, qui lui demande nécessaire, confortable et superflu.

Un morceau de houille jeté sur la grille d'une chaudière de machine à vapeur s'enflamme, et, en se combinant à l'oxygène, met en liberté une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'il avait jadis empruntée au soleil et qu'il s'était assimilée pendant la croissance de l'arbre dont il faisait partie. L'énergie ainsi dégagée est transmise, par conductibilité et rayonnement, à l'eau de la chaudière, la convertit en vapeur, et sa puissance mécanique se manifeste par la transformation du liquide en gaz, malgré la pression qu'il supporte. Amené ensuite de la chaudière à la machine, le fluide devenu gazéiforme y peut agir par detente, et l'énergie calorique dont il est chargé se transforme partiellement en énergie mécanique, et produit un travail utile, en poussant l'outil dans l'usine, la locomotive sur les rails, ou le navire sur les mers.

Ainsi nous pouvons suivre, à travers ses métamorphoses, l'énergie reçue jadis du soleil et conservée dans la houille jusqu'au jour où elle est utilisée; et nous pourrions aller plus loin encore et observer comment, dans chaque cas, elle subit des transformations nouvelles et retourne le plus souvent à l'état de chaleur.

Le changement qui s'opère dans le foyer de la machine est un phénomène chimique; la communication de la chaleur à l'eau et les effets subséquents qui accompagnent son passage à travers la machine sont des phénomènes physiques; l'étude de quelques-uns de ces phénomènes exige des opérations mathématiques compliquées. On ne peut donc arriver à une intelligence complète des principes qui régissent le fonctionnement de la machine à vapeur qu'après avoir étudié les sciences physiques avec un soin et une exactitude suffisants pour être en état d'en formuler les lois d'une manière précise. L'étude de la philosophie de la machine à vapeur implique celles de la chimie, de la physique et aussi d'une science nouvelle, l *énergètique*[1]; la thermodynamique, science aujourd'hui complète, est une branche de l'énergétique. Il est donc tout naturel de terminer l'étude du développement historique de la machine à vapeur, en esquissant celui des différentes sciences dont l'ensemble en constitue la philosophie, et particulièrement de la thermodynamique, science par excellence de la machine à vapeur et des autres machines thermiques.

Ces sciences, comme la machine elle-même, ont une origine antérieure à l'ère chrétienne; mais pendant bien des siècles leur développement est resté imperceptible, et c'est seulement depuis cent ans qu'elles ont enfin pris un essor soudain et rapide, et leur progrès ne s'est plus ralenti. Elles constituent maintenant un ensemble de connaissances dont l'épanouissement est complet, la base parfaitement sûre. Pourtant leur développement ne s'est nullement arrêté, pas plus que celui de la machine à vapeur ou des machines

1. *Science de l'énergie.* La définition exacte en est donnée plus loin. *(Note du traducteur.)*

thermiques, qui les suivent pas à pas. L'étude de ces sciences dans leur état actuel laisse tout au plus apercevoir la direction de leurs progrès futurs; mais elle permet d'affirmer qu'elles sont bien loin encore de l'état définitif qu'elles atteindront lorsqu'elles seront complètes, alors que tous les faits auront été constatés et que les lois pourront être codifiées.

Lorsque Héron vivait à Alexandrie, le grand « Muséum » était un centre important, autour duquel se réunissaient les maîtres de toutes les philosophies alors connues, de toutes les sciences alors admises, mais encore mal formées, et de toutes les branches des études techniques suffisamment développées pour comporter un enseignement systématique. Des observations astronomiques avaient été faites régulièrement et sans interruption, depuis deux mille ans, par les astronomes chaldéens; des annales remontant à plusieurs siècles avaient été conservées à Babylone par Callisthènes et transmises à Aristote, le père de la méthode scientifique moderne. Ptolémée avait eu à sa disposition les tableaux des observations d'éclipses des Chaldéens, comprenant une période de près de six cent cinquante ans et d'une exactitude merveilleuse[1].

Longtemps avant cette époque, on pratiquait un système d'impression grossière, au moyen d'un rouleau gravé, sur de l'argile plastique, qu'on faisait cuire ensuite et dont on constituait ainsi des bibliothèques céramiques. Dans le cabinet de travail de Héron se trouvaient beaucoup de ces livres en poterie.

Cet immense musée-bibliothèque d'Alexandrie fut fondé, trois siècles avant Jésus-Christ, par Ptolémée Soter; il fit de la grande cité égyptienne sa capitale, quand la mort de son frère, le jeune et fameux conquérant dont il donna le nom à la ville, l'appela au trône élevé par Alexandre sur les ruines de l'empire des Perses.

Embellie de tous les ornements et pourvue de tout le

1. Leur évaluation de la longueur du saros ou cycle d'éclipses — dont la durée dépasse dix-neuf ans — n'était erronée que de dix-neuf minutes et demie. — DRAPER.

luxe que pouvaient lui fournir les richesses d'un monde vaincu, l'habileté, le goût et l'esprit ingénieux des peintres, sculpteurs, architectes et ingénieurs de la Grèce, Alexandrie regorgeait de merveilles ; elle était une merveille elle-même. Riche, populeuse et magnifique, elle formait la métropole de l'univers civilisé. Le commerce, l'industrie, les beaux-arts florissaient dans cette splendide demeure. La science y trouvait un temple digne d'elle dans les murs du Muséum de Ptolémée, et ses adeptes étaient accueillis et protégés par le fondateur de l'institution et ses successeurs, Philadelphe et les derniers Ptolémées.

Le Muséum d'Alexandrie fut fondé dans le but, solennellement proclamé, de réunir tous les manuscrits ayant autorité, d'encourager l'étude de la littérature et des arts, de stimuler et d'aider les recherches scientifiques, expérimentales et mathématiques. Les fondateurs des bibliothèques, écoles techniques et collèges modernes ont eu leur prototype en intelligence, en patriotisme et en libéralité dans ce premier des Ptolémées, qui fit des dépenses énormes pour l'installation de ce grand établissement et n'épargna rien pour le faire prospérer. Des agents furent envoyés dans toutes les parties du monde pour y acheter des livres. Un personnel considérable de scribes était entretenu au Muséum, occupé sans relâche à multiplier les exemplaires des ouvrages précieux et à copier pour la bibliothèque ceux qu'on ne pouvait se procurer directement.

Le corps enseignant du Muséum n'était pas moins soigneusement organisé que la direction administrative. Les quatre facultés principales, astronomie, littérature, mathématiques et médecine, étaient subdivisées en sections, consacrées aux différentes spécialités de chaque département. Les collections du Muséum étaient aussi complètes qu'avaient pu les constituer les professeurs des sciences encore imparfaites de l'époque. On y donnait des leçons sur toutes les branches des connaissances humaines et le nombre des élèves atteignit parfois le chiffre de douze ou treize mille. On évalue à sept cent mille le total des livres qui s'y trouvaient réunis, quand les barbares chefs des légions romaines

de César en brûlèrent la plus grande partie. Il y en avait quatre cent mille dans le Muséum lui-même, qui furent tous anéantis; le reste était dans le temple de Sérapis, et échappa, pour cette fois, à la destruction.

Le plus grand de tous les grands hommes qui vivaient à Alexandrie lors de l'établissement du Muséum était Aristote, le précepteur d'Alexandre et l'ami de Ptolémée. C'est à lui que nous devons la coordination systématique des idées philosophiques de Platon et la création de la méthode inductive, origine première de toute la science moderne.

Les savants d'Alexandrie appliquèrent la méthode d'Aristote, et sur cette base solide ils élevèrent toutes les sciences alors connues et les constituèrent d'une façon si complète, que les sciences modernes n'en ont été que le simple développement.

La méthode inductive, fondement de toutes les sciences anciennes et point de départ de toutes celles constituées depuis, comporte deux opérations : en premier lieu, les phénomènes sont découverts et quantitativement déterminés; ensuite, quand un nombre suffisant de faits ont été ainsi observés et définis, ils sont groupés, et l'étude de leurs relations mutuelles conduit à la connaissanee des lois naturelles qui leur donnent naissance ou les régissent. Cette méthode si simple est la seule qui puisse faire progresser la science. C'est uniquement par elle que nous pouvons embrasser, d'une manière coordonnée et systématique, tous les phénomènes naturels qui relèvent des sciences physiques. Ce n'est qu'en appliquant la méthode et la philosophié aristotéliennes que nous pouvons espérer acquérir une connaissance scientifique exacte des phénomènes du moment présent, ou devenir capables de prévoir ceux qui se produiront plus tard. La méthode aristotélienne d'observer les faits, et de raisonner par induction en les prenant pour base, a enseigné au chimiste les propriétés des substances élémentaires connues, les caractères spécifiques qu'elles présentent dans des conditions données; elle lui a fait connaître les lois qui président à leurs combinaisons, les effets produits quand elles s'unissent, et lui

permet de prédire les changements et les phénomènes chimiques et physiques qui résultent nécessairement de leur contact dans telles circonstances déterminées.

C'est aussi grâce à cette méthode que le physicien a pu préciser les diverses sortes de mouvement moléculaire qui nous donnent la lumière, la chaleur ou l'électricité, ainsi que les lois et le mode suivant lesquels ces mouvements se transforment les uns dans les autres, en conservant leur énergie. C'est par ce procédé d'études que James Watt put découvrir et corriger les défauts de la machine de Newcomen; c'est la philosophie aristotélienne qui, de nos jours, enseigne à l'ingénieur la manière de construire le steamer moderne, et lui permet de prédire, avant même que la quille soit posée sur le chantier ou qu'un coup de marteau ait retenti, quel sera le poids du navire, quel chargement il pourra transporter, quelles dimensions et quelle puissance devront avoir ses machines, la quantité de charbon qu'elles consommeront chaque jour à travers l'océan, la profondeur à laquelle la coque s'enfoncera dans l'eau, et la vitesse exacte qu'atteindra le navire quand ses machines développeront leur puissance de 1,000 ou 10,000 chevaux.

C'est dans Alexandrie que cette philosophie puissante trouva, pour la première fois, un domaine pour développer son action. C'est là que Ptolémée étudiait l'astronomie et la « philosophie naturelle »; qu'Archimède s'adonnait à ces études si chères au mathématicien et à l'ingénieur; qu'Euclide exposait à son royal élève ces éléments de géométrie, qui font loi depuis vingt-deux siècles; qu'Ératosthène et Hipparque étudiaient et enseignaient l'astronomie, et inauguraient la méthode moderne de recherches quantitatives exactes, en prouvant la sphéricité de la terre; que Ctésibius et Héron enfin firent leurs recherches sur la pneumatique, et leurs expériences sur les premiers embryons de la machine à vapeur et autres mécanismes moins importants.

Lorsque, sept siècles plus tard, la destruction de ce splendide établissement fut consommée par le massacre de l'illustre philosophe païenne Hypatia, que des fanatiques, plus vraiment païens qu'elle, mirent en pièces au pied de

la croix, et par la dispersion de la bibliothèque du Sérapéum, qu'avaient épargnée les soldats de César, une vraie philosophie était créée, et la méthode inductive était assez forte pour vivre et surmonter tous les obstacles qu'elle devait rencontrer dans la voie des lumières et de là civilisation. La ruine du musée d'Alexandrie, si déplorable qu'elle fût, ne pouvait détruire la nouvelle méthode philosophique. Ses fruits mûrirent lentement mais sûrement, et nous en recueillons aujourd'hui la moisson splendide.

Science, littérature, industrie et beaux-arts sommeillèrent pendant plusieurs siècles après cette catastrophe, qui éteignit le foyer de lumière aux rayons duquel ils avaient fleuri.

Les armées des califes achevèrent l'œuvre abominable de destruction commencée par les armées de César, et la bibliothèque d'Alexandrie, partiellement anéantie par les Romains, complètement dispersée par les patriarches et leurs disciples aussi fanatiques qu'ignorants, vit enfin ses derniers débris brûlés par les Sarrasins. Mais quand leur soif de conquêtes se fut assouvie les sectaires des califes tournèrent leur attention vers les travaux intellectuels, et le IXe siècle de l'ère chrétienne vit une fois de plus, réunie à Badgad, une collection d'écrits philosophiques telle que la richesse et la puissance des nouveaux conquérants du monde pouvaient seules en composer une pareille. La philosophie reprit son empire et une autre race étudia les mathématiques de l'Inde et de la Grèce, l'astronomie de la Chaldée, et toutes les sciences originaires de Grèce et d'Égypte. La conquête de l'Espagne par les Sarrasins importa dans l'ouest de l'Europe cette civilisation nouvelle et, sous les dominateurs maures, se formèrent des bibliothèques, dont l'une comptait plus d'un demi-million de volumes.

Partout où les armées sarrasines avaient imposé la lo de Mahomet, écoles et collèges, bibliothèques et collections d'instruments de physique se rencontraient en profusion extraordinaire. Les élèves et les maîtres, philosophes de toutes doctrines, doctrine spéculative ou doctrine

d'Aristote, se rallièrent autour de ces noyaux intellectuels, aussi enthousiastes dans leurs travaux que leurs prédécesseurs d'Alexandrie. Les donations à des collèges, dont l'importance donne une mesure exacte de l'intelligence des classes riches dans une société quelconque, devinrent aussi fréquentes, peut-être même davantage, qu'elles le sont aujourd'hui ; il fut pourvu à l'éducation des pauvres aussi bien qu'à celle des riches. Les sciences mathématiques, les magnifiques et merveilleux phénomènes qui, dix siècles plus tard, furent réunis en un corps de science sous le nom de chimie, avaient un attrait spécial pour les écoliers arabes ; et les applications pratiques des faits et des lois que l'on découvrait amenèrent un prodigieux développement des arts et de l'industrie.

C'est ainsi que, vers le XIe siècle, le foyer de l'activité intellectuelle et de la civilisation matérielle, après s'être déplacé d'Orient en Occident, s'était fixé en Andalousie. A ce moment, les principes de toutes les sciences physiques modernes étaient assis sur une base solide, l'expérience, à part ceux de l'énergétique, cette science d'une si vaste portée, qui même aujourd'hui ne fait que de naître ; les mathématiques formaient un édifice élégant et symétrique. Et même le principe fondamental de toutes les sciences, celui de la conservation de l'énergie, avait été énoncé, peut-être d'une manière inconsciente.

Des historiens illustres ont montré comment le progrès de la civilisation en Europe a eu pour résultat, pendant le moyen âge, la création de la bourgeoisie, aujourd'hui si puissante, qui, en possession de l'autorité politique, gouverne toutes les nations civilisées, qui s'est emparée du pouvoir peu à peu et progressivement, si bien qu'il a fallu des siècles pour que son influence devînt visible et tangible.

La classe moyenne, appelée par Buckle[1] la classe intellectuelle, ne commença qu'au XIVe siècle à se dégager de l'armée et du clergé et à prendre une existence indépen-

1. *History of civilization in England,* t. Ier, p. 208. — Londres, 1868.

dante. Pendant les deux siècles suivants, son influence et son pouvoir s'accrurent, et au XVIIe nous trouvons les magnifiques progrès réalisés dans toutes les branches de la science, de la littérature et des arts, marquant la complète émancipation de l'intelligence, échappée au joug artificiel qui si longtemps avait arrêté son essor.

C'est ainsi qu'après un nouvel intervalle de plusieurs siècles de stagnation intellectuelle s'est produite cette autre révolution sociale. Les envahisseurs musulmans étaient chassés d'Europe ; les croisés avaient envahi la Palestine dans le vain espoir d'arracher aux mains des Infidèles le Saint-Sépulcre et la Terre-Sainte ; des querelles intestines et des guerres internationales, s'ajoutant à ces grands mouvements sociaux, éloignèrent encore une fois les esprits des arts de la paix et des études scientifiques. Ce n'est qu'au commencement du XVIIe siècle, le temps de Galilée et de Newton, que les nations de l'Europe trouvèrent assez de calme et de sécurité pour laisser l'attention générale se porter vers les questions intellectuelles ; pourtant, un demi-siècle auparavant (1543), Copernic avait légué au monde cet héritage destiné à révolutionner les théories astronomiques, en démontrant l'hypothèse qui faisait du soleil le centre du système solaire.

En ce temps-là Galilée commençait à saper les spéculations de la philosophie déductive ; il proclamait le principe, alors contesté, que le livre de la nature doit faire foi dans l'étude des vérités théologiques et révélées, en tant qu'elles touchent à la science ou sont affectées par elle ; il fut condamné au martyre pour avoir osé soutenir que les lois de Dieu, telles qu'elles existent, ont été instituées sans déférence pour les idées préconçues des plus ignorants des hommes. Quelques années auparavant (1600), Bruno était mort sur le bûcher pour un crime semblable.

Galilée est peut-être le premier qui, aux théories de Platon, à la philosophie d'Aristote, ait joint la méthode moderne de l'expérimentation ; en appliquant simultanément et avec persévérance ces puissantes ressources, il a fondé la méthode scientifique d'investigation qui, de nos

jours, est devenue universelle. Il montra clairement comment, en groupant dans leur ordre naturel les phénomènes constatés, on déduit les lois qui régissent l'ensemble de ces phénomènes ; il indiqua le principe connu de nos jours sous le nom de loi de continuité, loi universelle, qui relie les opérations de la nature en une chaîne continue d'effets, remontant du présent au passé, connu ou inconnu, vers une cause, qui peut être ou ne pas être déterminable par la science ou indiquée par l'histoire.

L'Italien Galilée trouva un digne émule dans Newton, le prince des physiciens anglais. La mécanique rationnelle commençait à peine à prendre la place qu'elle a plus tard occupée dans la science ; la grande œuvre de grouper les faits déjà vérifiés et de fixer définitivement les principes jusque-là vaguement entrevus fut magnifiquement accomplie par Newton. Les besoins de l'astronomie physique le contraignirent d'exécuter ce travail.

Léonard de Vinci avait, dans la dernière moitié du xve siècle, résumé tout ce qui avait été formulé jusqu'à lui sur la mécanique statique ; il décrivit aussi tout ce qu'on savait au sujet du frottement, y ajouta beaucoup lui-même et en énonça les lois. Il se faisait évidemment une idée juste du principe des « vitesses virtuelles », ce cas simple d'équivalence du travail dans un système à liaisons, qui a rendu depuis de si grands services ; et à sa philosophie mécanique cet ingénieur, cet artiste à l'esprit changeant mêlait curieusement beaucoup de science physique. Puis était venu, cent ans plus tard (1586), Stevin, le « brave ingénieur de Bruges », qui, travaillant alternativement au bureau et sur le terrain, à peu près comme font les ingénieurs d'aujourd'hui, écrivit un traité de mécanique, qui montrait l'utilité de l'expérience et du sens pratique, même dans un ouvrage de science. C'est ainsi que la voie fut préparée pour Newton.

Dans l'intervalle, Kepler, après quinze ans de tâtonnements, avait enfin découvert la vraie relation entre les distances des planètes au soleil et la durée de leurs révolutions, posant ainsi les principaux jalons de la mécanique céleste ;

et Galilée avait énoncé les lois du mouvement. La dynamique se trouva fondée comme science distincte de la statique, et l'on vit poindre cette science plus moderne de l'énergétique, qui constitue pour une si large part la philosophie de la machine à vapeur.

Hooke, Huyghens et d'autres encore avaient déjà aperçu quelques-unes des principales conséquences de ces lois, mais il était réservé à Newton de les énoncer avec la précision d'un mathématicien véritable, d'édifier un système de lois dynamiques, de compléter ces découvertes par celle de la gravitation universelle ; c'est sur cette base solide que se sont élevés tous les progrès de l'astronomie moderne ; les travaux de Newton ont été le point de départ de toutes les déterminations quantitatives, dans le calcul des dimensions, des poids, des distances, des mouvements des corps célestes, résultats qui nous plongent dans l'étonnement et l'admiration.

Les Arabes et les Grecs avaient remarqué qu'un corps tombant sous l'action de la pesanteur se dirigeait vers le centre de la terre, quel que fût l'endroit où avait lieu sa chute ; Galilée avait prouvé, par ses expériences de Pise, que la vitesse de chute variait d'une seconde à l'autre comme les nombres 1, 3, 5, 7, 9, etc., que les distances parcourues étaient proportionnelles au carré du temps total de la chute, et que, pour les obtenir en pieds anglais, il fallait prendre presque exactement 16 fois le carré de ce temps exprimé en secondes. Enfin Képler avait prouvé que les mouvements des corps célestes sont exactement les mêmes que s'ils étaient soumis à l'action de forces attractives centrales et de la force centrifuge.

En combinant toutes ces données, Newton fut amené à croire qu'il existe une « force de gravité », due à l'attraction, par la grande masse de la terre, de ses propres parties et des corps voisins, tels que la lune ; force dont l'influence s'étendait au moins jusqu'à notre satellite lunaire. Il calcula le mouvement de la lune, en supposant exacte sa théorie et les dimensions qu'assignaient au globe les mesures d'alors, mais il n'obtint qu'une approximation grossière.

Plus tard, en 1679, il reprit ses calculs, en se servant des déterminations plus précises, faites par Picard, de la forme du sphéroïde terrestre, et il obtint un résultat concordant parfaitement avec les relèvements, soigneusement établis par les astronomes, du mouvement de la lune.

Par la publication des *Principia* de Newton, la mécanique devenait un corps de science logiquement coordonné et aussi complet qu'il pouvait l'être, en dehors des principes de l'énergétique ; les lois du mouvement énoncées par Newton, précises et absolument parfaites comme elles semblent l'être, étant appliquées à des corps se mouvant librement sous l'action de forces extérieures constantes ou variables, devinrent la base de toute la dynamique. Elles constituèrent pour cette science un fondement aussi solide que le sont les principes élémentaires de géométrie pour le magnifique édifice qu'ils supportent.

Les trois lois fondamentales de la mécanique peuvent se formuler ainsi :

1° Tout corps libre dans l'espace reste dans l'état où il se trouve, repos ou mouvement rectiligne, jusqu'à ce qu'il en soit tiré par l'action de forces extérieures.

2° L'accélération du mouvement est proportionnelle à la force appliquée, et s'effectue dans la direction de la ligne droite suivant laquelle cette force agit.

3° A une action est toujours opposée une réaction égale et de sens contraire.

Nous pouvons ajouter à ces principes une définition également complète de la force :

Une *force* est ce qui produit ou tend à produire, dans les corps, un mouvement ou une modification de mouvement. La mesure statique d'une force est le poids qui lui fait équilibre ou la pression qu'elle exerce ; sa mesure dynamique est la vitesse qu'elle communique dans l'unité de temps à l'unité de masse.

Les déterminations quantitatives des effets dynamiques des forces sont toujours faciles à faire, en partant de la donnée suivante : sur un corps libre dans l'espace, l'effet d'une force égale à son propre poids est de produire, en

une seconde, une vitesse de 32,2 pieds pendant ce laps de temps ; telle est l'unité de mesure dynamique.

Le *travail* est le produit de la résistance que surmonte une force par la longueur du chemin parcouru dans la direction de cette force.

L'*énergie* est le travail qu'un corps est capable de développer par son poids ou son inertie, dans certaines conditions déterminées. L'énergie d'un corps qui tombe ou d'un projectile en mouvement est d'environ le 1.64 de son poids multiplié par le carré de sa vitesse, ou, ce qui revient au même, le produit de son poids par la hauteur de chute correspondant à sa vitesse[1].

Ces principes et ces définitions, en y joignant les conceptions fort anciennes du temps et de l'espace, suffiraient pleinement pour ouvrir la voie à la plus grandiose de toutes les généralisations physiques : la doctrine de la persistance ou conservation de toute énergie; puis, à son corollaire, l'équivalence de toutes les formes affectées par l'énergie, ainsi qu'à la preuve expérimentale de ce fait que l'énergie peut se transformer, se présenter sous des modalités diverses, mais qu'elle se retrouve toujours dans les différentes natures de mouvements qu'exécutent les corps et leurs molécules.

C'est à peine si, du temps de Newton, on accordait que la science physique expérimentale est la seule méthode qui permette d'arriver à la connaissance des phénomènes naturels ; mais bientôt ce principe fut généralement accepté. En physique, Gilbert avait fait, avant Newton, des recherches importantes, et les expériences de Galilée à Pise avaient fourni des exemples d'études non moins précieuses. En chimie, ce fut seulement un siècle plus tard, lorsque Lavoisier eut montré, par ses magnifiques découvertes, ce que pouvait donner l'habile et intelligent emploi des déterminations quantitatives, lorsqu'il eut fait de la balance l'outil le plus indispensable du chimiste, que fut

1. C'est-à-dire la hauteur d'où il devrait tomber librement pour acquérir cette vitesse sous l'action de la pesanteur. *(Note du traducteur.)*

constituée la science embrassant tous les faits et toutes les lois des modifications chimiques et des combinaisons moléculaires. Nous avons déjà vu comment l'astronomie et les mathématiques réunies, avec leurs compléments nécessaires, l'expérience et l'observation, conduisirent les savants à la création et à l'étude de ce qui devint enfin la science mécanique. Nous pouvons maintenant nous rendre compte que toutes les sciences physiques découlent de quatre conceptions primitives, à savoir : celles de matière, de force, de mouvement et d'espace, les deux dernières comprenant tous les rapports de position.

Établie sur ces notions, la science mécanique se divise en quatre sections, qui sont d'une application générale dans l'étude de tous les phénomènes physiques :

La *Statique*, qui traite de l'action et de l'effet des forces;

La *Cinématique*, qui traite simplement des relations de mouvement[1];

La *Dynamique* ou *Cinétique*, qui traite du mouvement simple, considéré comme effet de l'action des forces.

L'*Énergétique*, qui traite des modifications de l'énergie sous l'action des forces, de sa transformation dans ses divers modes de manifestation, et de sa transmission d'un corps à un autre.

Cette quatrième division de la philosophie mécanique comprend la plus récente des sciences secondaires, celle dont les machines thermiques et, en particulier, les machines à vapeur représentent les applications les plus importantes : la *Thermodynamique*. Cette science n'est autre chose qu'une généralisation plus étendue de principes établis successivement par des savants fort éloignés les uns des autres, historiquement et géographiquement, dans le temps et l'espace. Nous avons vu ces principes s'agréger lentement, pour constituer une à une les diverses sciences; nous assistons à une évolution nouvelle, lente comme les précédentes, qui nous amène à des vues plus larges, à cet

1. C'est-à-dire sans se préoccuper des causes qui le déterminent. *(Note du traducteur.)*

état scientifique qui semble répondre à la prédiction de Cicéron : « Une loi unique, éternelle et immuable, embrasse toutes les choses et tous les temps. » A la base première de la science de l'énergétique, nous retrouvons cet axiome, antérieur au nom même et à l'origine de toute science :

Tout ce qui existe, matière ou force, et sous n'importe quelle forme, est indestructible, si ce n'est par la Puissance Infinie qui l'a créé.

L'indestructibilité de la matière par une puissance finie est chose admise depuis que les chimistes, guidés par leur maître à tous, Lavoisier, commencèrent à se servir de la balance, et purent ainsi démontrer que, dans toutes les transformations chimiques, il ne s'opère qu'une modification de forme ou de combinaison des éléments, sans qu'il y ait jamais aucune perte de matière. La « persistance » de l'énergie est une découverte plus récente ; elle est la conséquence de ce fait, constaté par expérience, que l'énergie-chaleur peut se convertir en d'autres formes d'énergie, notamment en travail mécanique. Cette découverte est due à Rumford et à Davy, ainsi qu'aux savants qui ont établi l'équivalence entre le travail et la chaleur : Newton, qui l'avait pressentie, Colding et Mayer, qui donnèrent une valeur approximative du coefficient d'équivalence, Joule, qui l'a mesuré avec une exactitude probablement très grande.

Ce fait capital de la conservation de l'énergie fut vaguement indiqué par Newton, qui affirma que le travail du frottement représente la *vis viva* (force vive) du système ou corps auquel le frottement est appliqué. En 1798, Benjamin Thompson, comte Rumford, Américain alors au service de la Bavière, présenta à la Société royale de Londres un mémoire[1], où il exposait les résultats d'une expérience qu'il venait de faire et qui prouvait l'immatérialité de la chaleur et la transformation de l'énergie-chaleur en force mécanique. Ce mémoire est d'un grand intérêt historique ; la doctrine, maintenant acceptée, de la conservation

(1) *Philosophical Transactions,* 1798.

de l'énergie n'est qu'une généralisation des résultats obtenus par de nombreuses recherches, dont les plus importantes sont celles qui ont établi une relation d'équivalence définie entre ces deux formes d'énergie, et d'en mesurer la valeur aujourd'hui connue sous le nom d'*équivalent mécanique de la chaleur*. L'expérience de Rumford consistait à



Fig. 138. — Benjamin Thompson, comte Rumford.

déterminer la quantité de chaleur produite par le forage d'un canon à l'arsenal de Munich.

Après avoir prouvé que cette chaleur n'avait pu être empruntée à aucun des objets environnants, ni provenir de la compression des matériaux employés ou travaillés, il s'exprimait ainsi : « Il me semble extrêmement difficile, sinon impossible, de concevoir nettement quelque chose qui puisse être excitée et communiquée de la même manière que la chaleur fut excitée et communiquée dans ces expé-

riences, à moins que ce ne soit du mouvement[1]. » Il continue en recommandant d'étudier avec zèle et persévérance les lois qui régissent ce mouvement. Mesurant la chaleur développée par une force qui pouvait être aisément produite par un seul cheval, il l'estimait égale à celle de la combustion de 9 bougies de 3/4 de pouce de diamètre chacune, et équivalant à ce qu'il fallait pour élever 25,68 livres d'eau de la température de la glace jusqu'au point d'ébullition, soit : 4784,4 unités de chaleur[2]. Le temps nécessaire était évalué à 150 minutes. En prenant comme le chiffre le plus probable pour le cheval bavarois de Rumford, celui de 25,000 livres élevées à un pied de hauteur par minute[3], nous déduisons de ces données, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, 783,8 unités correspondant à une livre-pied; ce qui ne diffère que de 1,5 pour 100 de la valeur aujourd'hui admise.

Si Rumford avait pu éliminer toutes les pertes de chaleur par évaporation, rayonnement et conductibilité, pertes qu'il a signalées, et mesurer l'effort avec exactitude, l'approximation eût été plus grande encore. Rumford découvrit ainsi par expérience la nature réelle de la chaleur; il prouva qu'elle n'est qu'une forme particulière de l'énergie ; il publia ce résultat un demi-siècle avant l'exécution des expériences exactes qui aujourd'hui font loi, et donna une valeur très approchée de l'équivalent mécanique de la

1. Rumford n'est pas le premier qui ait exprimé cette idée. Bacon semble l'avoir eue également, et Locke dit d'une façon assez explicite : « La chaleur est une agitation très brusque des particules invisibles de l'objet .. de sorte que ce qui pour nos sens est chaleur n'est, pour l'objet, rien autre chose que mouvement. »

2. L'unité de chaleur anglaise est la quantité nécessaire pour élever de 1° Fahrenheit la température d'une livre d'eau prise au maximum de densité.

3. Rankine donne 25,920 livres-pieds par minute, ou 432 par seconde, pour la moyenne du cheval de trait anglais, ce qui est probablement trop élevé pour la Bavière. La « force d'un cheval » de l'ingénieur — 33,000 livres-pieds par minute — surpasse beaucoup la puissance moyenne, même d'un bon cheval de trait, qui, suivant une évaluation assez commune, n'en est que les deux tiers.

chaleur. Rumford remarqua aussi que la chaleur engendrée est « exactement proportionnelle à la force avec laquelle les deux surfaces sont pressées l'une contre l'autre et à la rapidité du frottement », ce qui revient simplement à dire qu'il y a équivalence entre la quantité de travail consommé ou d'énergie dépensée, et la quantité de chaleur dégagée. Tel fut le premier progrès important qui ait ouvert la voie à la thermodynamique. Les travaux de Rumford sont la pierre angulaire de cette science.

Peu après (1799) sir Humphry Davy publia les détails d'une expérience, qui confirmait d'une manière décisive les conséquences tirées du travail de Rumford. En frottant deux morceaux de glace l'un contre l'autre, il constata que ce frottement amenait leur fusion. D'où il concluait : « Il est évident que par le frottement la glace est changée en eau..... Le frottement, par conséquent, ne diminue pas la capacité des corps pour la chaleur. »

Bacon et Newton, Hooke et Boyle, semblent avoir, longtemps avant Rumford, admis comme probable la théorie dynamique ou vibratoire de la chaleur, et vu en elle une forme du mouvement; mais ce fut Davy qui, en 1812, exposa clairement et avec précision la nature réelle de la chaleur en disant : « La cause immédiate du phénomène de la chaleur est due au mouvement, et les lois en vertu desquelles elle se communique sont exactement les mêmes que celles de la communication du mouvement. » Cette opinion reposait sur la même base que celle de Rumford.

Une fois ces notions établies, il devint évident que la détermination de la valeur exacte de l'équivalent mécanique de la chaleur n'était plus qu'une affaire d'expérience; et pendant la génération suivante, cette détermination fut faite, avec plus ou moins d'exactitude, par plusieurs savants distingués. Il était également clair que l'on pouvait exprimer mathématiquement les lois qui régissent la science nouvelle, la thermodynamique.

Déjà Fourier avait appliqué l'analyse mathématique à la solution de problèmes relatifs à la transmission de la chaleur sans transformation; et sa « théorie de la chaleur »

contenait des recherches d'une grande beauté sur cette question. Douze ans après (1824), Sadi Carnot publiait ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu;* c'était une première tentative pour dégager les principes impliqués dans l'application de la chaleur à la production d'un effet mécanique. Partant de cet axiome qu'un corps qui, après avoir passé par une série de conditions modifiant sa température, est revenu à son état primitif comme densité, comme température et comme constitution moléculaire, doit contenir la même quantité de chaleur que primitivement, il montre que l'effet utile des machines thermiques doit être calculé en faisant passer le fluide moteur par un cycle complet, commençant et finissant dans les mêmes conditions physiques. Carnot n'était pas partisan de la théorie vibratoire de la chaleur[1] et par conséquent il fut entraîné dans quelques erreurs: mais, comme on le verra plus loin, l'idée que nous venons de rappeler constitue l'un des points les importants de la théorie de la machine à vapeur.

Seguin, qui fut, comme on l'a vu, l'un des premiers à appliquer la chaudière tubulaire aux locomotives, publia en 1839 un ouvrage intitulé : *Sur l'influence des chemins de fer,* dans lequel il rappelle les données nécessaires à une grossière détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, sans en déduire lui-même la valeur.

Trois ans plus tard (1842), le docteur Mayer, de Heilbronn, publia les résultats d'un calcul très ingénieux et fort approché de l'équivalent de la chaleur, en basant son évaluation sur le travail nécessaire pour comprimer l'air, et sur les chaleurs spécifiques des gaz ; l'idée fondamentale était que le travail de compression est l'équivalent de la chaleur dégagée. Seguin avait fait l'opération inverse, en prenant la perte de chaleur éprouvée par la vapeur pendant sa

1. Il résulte de documents récemment découverts et communiqués à l'Académie des sciences de Paris (*Comptes rendus,* 1878, p. 967) que Sadi Carnot en était arrivé, par ses propres réflexions, à cette conviction que chaleur et mouvement ne sont qu'une seule et même chose. *(Note du traducteur.)*

détente, comme l'équivalent du travail qu'elle exécute. Mayer fut aussi le premier à signaler ce fait, prouvé depuis expérimentalement par Hirn, que le fluide sortant d'une machine, après avoir travaillé, doit échauffer l'eau du condenseur moins que ne l'eût fait ce même fluide à son entrée dans la machine.

A peu près vers le même temps (1843), un ingénieur



Fig. 139. — James Prescott Joule.

danois, Colding, publia les résultats d'expériences faites pour déterminer le même coefficient ; mais le travail le meilleur et le plus considérable, celui qui maintenant est presque universellement accepté comme un modèle, fut l'œuvre d'un investigateur anglais.

James Prescott Joule, le physicien dont nous voulons parler, commença les recherches expérimentales qui l'ont rendu célèbre quelque temps avant 1843, date à laquelle il publia, dans le *Philosophical Magazine*, la première méthode

dont il se servit. Cette détermination lui donna 770 livres-pieds. Pendant les cinq ou six années suivantes, Joule reprit son travail, et, en variant ses procédés d'expérimentation, il obtint des résultats fort divergents. L'un de ces procédés consistait à déterminer la chaleur produite en comprimant de l'air dans des tubes, un autre, et le plus habituel, était de faire tourner une roue à aubes par une force connue, dans un poids d'eau déterminé. Enfin, en 1849, ces recherches furent terminées.

La méthode employée par le docteur Mayer d'Heilbronn, pour calculer l'équivalent mécanique de la chaleur, est aussi belle qu'ingénieuse. Concevons deux masses égales d'air atmosphérique enfermées à la même température, à zéro par exemple, dans des vases pouvant contenir chacun un pied cube. Échauffons ces deux masses de gaz, en maintenant l'une au volume primitif et permettant à l'autre de se dilater sous une pression constante égale à celle de l'atmosphère. Dans chaque récipient nous avons enfermé un poids d'air égal à 0,08073 livre ou 1,29 once d'air. Lorsque, ces deux masses étant toujours à la même température, la pression de l'une et le volume de l'autre auront doublé, cette température commune sera de 525°,2 Fahrenheit ou 274° centigrades; et chaque masse aura en réalité une température double de celle qu'elle avait à l'origine, en la mesurant sur l'échelle absolue commençant au zéro du mouvement calorifique. Mais l'une n'aura absorbé que 6 unités 3/4 thermiques anglaises, tandis que l'autre en aura absorbé 9 1/2. Dans le premier cas, toute cette chaleur aura été employée à élever simplement la température de l'air; dans le second, cette température aura été également augmentée, et, en outre, il aura été consommé un certain travail (2116,3 livres-pieds) pour surmonter la résistance due à la pression de l'atmosphère; telle est la cause à laquelle nous devons attribuer la chaleur additionnelle disparue. Or on a $\frac{2116,3}{2\ 3/4} = 770$ livres-pieds par unité de chaleur, soit presque rigoureusement la valeur déduite des expériences de Joule. Si les données sur lesquelles reposait le calcul de

Mayer avaient été absolument exactes, le résultat eût été une détermination précise de l'équivalent de la chaleur, en admettant que, dans le cas considéré, il n'y ait point de travail interne capable d'absorber de la chaleur.

La mesure de Joule, probablement la plus exacte, fut obtenue par l'emploi d'une roue à aubes tournant dans l'eau ou un autre liquide. Un récipient de cuivre contenait un poids de liquide soigneusement déterminé ; sur le fond était fixée une crapaudine recevant l'axe vertical d'une roue à palettes. Cette roue était mise en mouvement par des cordes passant sur des poulies parfaitement équilibrées, dont les axes étaient portés par des galets. Les forces motrices étaient obtenues par des poids suspendus aux extrémités de ces cordes. En tombant jusqu'au sol, ils produisaient une quantité de travail P × H, facile à mesurer avec précision, qui faisait faire à la roue à aubes un certain nombre de révolutions, pendant que l'eau s'échauffait en absorbant la chaleur correspondant au travail consommé. Après avoir relevé le poids et répété cette opération un nombre de fois suffisant, on mesurait soigneusement la quantité de chaleur communiquée à l'eau, et on la comparait au travail dépensé. Joule se servait aussi de deux disques en fer qu'il faisait frotter l'un contre l'autre dans un vase plein de mercure, et il mesurait la chaleur développée par le frottement en la comparant au travail fait. La moyenne de quarante expériences avec l'eau donna, pour l'équivalent cherché : 772,692 livres pieds ; cinquante, avec le mercure, donnèrent : 774,083 ; vingt, avec la fonte : 774,987 ; la température de l'appareil étant de 55° à 60° Fahrenheit.

Joule constata, aussi par expérience, un fait que les principes maintenant connus de la thermodynamique permettent de prévoir, à savoir : qu'aucun changement de température n'accompagne la dilatation de l'air ou d'un autre gaz, lorsqu'elle a lieu sans production de travail. Il a formulé comme il suit les résultats de ses recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur :

1° La chaleur produite par le frottement des corps

solides ou liquides, est toujours proportionnelle à la quantité de travail dépensé.

2° La quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'une livre d'eau (pesée dans le vide à 55° ou 60° Fahrenheit), exige pour sa production la dépense d'un travail mesuré par la chute de 772 livres de la hauteur d'un pied. Cette quantité est maintenant appelée généralement « l'équivalent de Joule ».

Dans cette série d'expériences, Joule détermina aussi la position du « zéro absolu », le point auquel cesse le mouvement calorique. Il le fixa à 480° Fahr. environ au-dessous du point de congélation de l'eau, ce qui n'est pas très loin de la valeur probablement vraie de — 493°,2 Fahr. (273° cent.), déduite ultérieurement de données plus précises.

Le résultat de ces expériences et de celles, plus récentes, de Hirn et autres, a conduit au principe suivant :

L'énergie-chaleur et l'énergie-mécanique sont transformables l'une dans l'autre suivant un coefficient d'équivalence déterminé ; l'unité thermique anglaise correspond à 772 livres-pieds de travail, et la *calorie* métrique à 423,55 ou, en nombres ronds, 424 kilogrammètres. Toutefois la valeur exacte n'est pas encore absolument fixée.

Il est aujourd'hui généralement admis que toutes les variétés d'énergie dues à des forces physiques sont aussi transformables les unes dans les autres ; et il n'est nullement prouvé que l'énergie vitale et intellectuelle ne tombe pas elle-même sous le coup de cette grande loi générale. C'est sur cette équivalence que repose toute la science de l'énergétique.

L'étude en a été, jusqu'aujourd'hui, restreinte surtout à cette branche spéciale, qui comprend les relations entre l'énergie mécanique et l'énergie calorifique, et qui constitue la thermodynamique. Rankine, Clausius, Thompson, Hirn et d'autres, ont conquis sur ce terrain une grande célébrité. Dans le cours des recherches poursuivies par ces illustres savants, les phénomènes relatifs à la transmission de la chaleur dans les fluides élastiques, et les modifications qu'éprouve leur état physique quand l'énergie calorifique vient à changer, ont fait l'objet d'études spéciales.

D'après la loi de Boyle et de Mariotte, l'expansion de ces fluides suit une marche exprimée graphiquement par une hyperbole, et algébriquement par l'expression $PV^x = A$, dans laquelle $x = 1$ quand la température est constante. Une des premières et des plus évidentes conséquences du



Fig. 140. — Le professeur W.-J.-M. Rankine.

principe de l'équivalence est que la valeur de x doit croître en même temps que l'énergie dépensée pendant l'expansion. Ces variations sont très notables pour les fluides tels que la vapeur d'eau : l'exposant x est plus petit que l'unité quand la vapeur se détend sans produire de travail ; tandis que, lorsqu'elle travaille en se détendant derrière un piston, il y a condensation partielle, et la valeur de x s'élève jusqu'à 1,111 d'après Rankine, ou sans doute, plus exactement, jusqu'à 1,135 ou davantage, selon Zeuner et Grashof. Ce fait a une influence considérable sur la théorie de la machine à vapeur. C'est à Rankine que nous devons le pre-

mier traité complet sur cette théorie, envisagée au point de vue de la thermodynamique.

Le professeur Rankine commença ses recherches dès 1849; à cette époque il proposa une théorie de la constitution de la matière, bien connue aujourd'hui sous le nom de théorie des tourbillons moléculaires. Supposant un système d'anneaux tournants ou tourbillons animés de mouvements calorifiques, il établit sa théorie en partant de cette hypothèse, que la chaleur sensible est employée à modifier la vitesse du mouvement des particules, tandis que la chaleur latente a pour effet de changer les dimensions des orbites, et en admettant que chaque tourbillon tend à s'élargir en vertu de la force centrifuge. Il établit une distinction entre les chaleurs spécifiques réelle et apparente, et montra que, dans l'échauffement d'un fluide, la chaleur transmise se divise en deux parties, l'une produisant l'élévation de la température, l'autre l'augmentation du volume. Il proposait, pour désigner cette dernière quantité, le terme de potentiel calorifique, et pour la somme des deux, le mot de fonction thermodynamique.

Carnot avait établi, un quart de siècle auparavant, que l'effet utile d'une machine thermique est une fonction des deux températures extrêmes entre lesquelles elle fonctionne, et non de la nature de la substance motrice, assertion parfaitement vraie quand cette substance ne change pas d'état physique pendant qu'elle agit. Rankine en déduit cette « équation générale de la thermodynamique », qui exprime algébriquement les relations entre la chaleur et l'énergie mécanique, quand le fluide change d'état, ce qui permet de calculer la quantité de chaleur transformée en travail correspondant à une modification donnée du fluide.

Il démontre que, dans une machine à vapeur produisant du travail, la détente est accompagnée d'une condensation partielle. Il prouve que la chaleur totale d'un gaz parfait doit s'accroître, avec l'élévation de température, proportionnellement à la chaleur spécifique sous pression constante.

En 1850, Rankine fit voir l'inexactitude du chiffre 0,2669, alors accepté pour représenter la chaleur spécifique de l'air sous pression constante, et donna pour valeur exacte le chiffre 0,24. Trois ans plus tard, les expériences de Regnault conduisaient au nombre 0,2379 ; et Rankine, reprenant ses calculs, trouvait comme résultat 0,2377. En 1851, Rankine poursuivait ses recherches, et, s'appuyant sur sa théorie, il corroborait la loi de Thompson, qui donne, pour mesure de l'effet utile d'une machine thermique parfaite, le quotient de la variation de température du fluide moteur par sa température la plus élevée, mesurée à partir du zéro absolu.

Dans l'intervalle, le physicien allemand Clausius s'occupait du même sujet en suivant une méthode toute différente; il étudiait les effet mécaniques de la chaleur sur les gaz et en déduisait, presque en même temps que Rankine (1850), l'une des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur.

Il trouva que le zéro probable du mouvement calorifique, est tel, que la fonction de Carnot représente la réciproque de la température « absolue », mesurée approximativement par le thermomètre à air ou, plus exactement, par un thermomètre à gaz parfait. Il confirma le théorème de Rankine sur la condensation des vapeurs saturées, quand elles se détendent en surmontant une résistance. En 1854, il adapta le principe de Carnot à la nouvelle théorie. Il montra que les idées du physicien français sur les machines réversibles et les cycles complets étaient encore valables, malgré l'erreur de Carnot sur la véritable nature de la chaleur. Clausius a énoncé aussi ce principe d'une extrême importance : Il est impossible à une machine agissant par elle-même, sans l'aide d'une force extérieure, de transporter de la chaleur d'un corps froid sur un autre corps plus chaud.

En même temps que Rankine et Clausius, le professeur William Thompson se livrait à des recherches sur la thermodynamique (1850). Il fut le premier qui formula le principe de Carnot, adapté par Clausius à la théorie moderne,

sous la forme des deux propositions suivantes, généralement admises aujourd'hui[1] :

1° Quand des effets mécaniques égaux sont produits par une action exclusivement thermique, la transformation d'énergie fait naître ou disparaître des quantités égales de chaleur.

2° Si dans une machine quelconque le fonctionnement en sens inverse produit une inversion complète de l'opération dans tous ses détails physiques et mécaniques, la machine est parfaite; et elle donne l'effet utile maximum pour une quantité de chaleur déterminée et entre deux températures extrêmes déterminées.

Parmi les premières conséquences qu'ils déduisirent de ces principes, William Thompson et James Thompson signalèrent ce fait, depuis lors confirmé par l'expérience, que le point de fusion de la glace doit être abaissé par la pression, à raison de 0°,0135 Fahrenheit par atmosphère; et que, dans un corps qui se contracte quand on l'échauffe, une compression brusque amène toujours un abaissement de température. Thompson se servit des formules de l'énergétique dans ses vastes recherches sur l'électricité, et Helmholtz dans ses études favorites sur l'acoustique.

L'application de ces principes, désormais bien établis, à la physique des gaz, conduisit à plusieurs conséquences importantes et intéressantes : Clausius démontra les relations entre le volume, la densité, la température et la pression des gaz et leurs modifications; Maxwell donna une démonstration nouvelle de la loi établie expérimentalement par Dalton et Charles, et connue également sous le nom de Gay-Lussac (1801), à savoir : qu'à pression, température et volume égaux, tous les gaz contiennent un même nombre de molécules. Sur le continent, Hirn, Zeuner, Grashof, Tresca, Laboulaye et d'autres ont, pendant la même période et depuis lors, continué et considérablement étendu ces recherches théoriques.

1. Voir l'admirable *Sketch of Thermodynamics* de Tait; seconde édition, Édimbourg, 1877.

Il s'est fait dans cet intervalle un énorme travail expérimental, dont le résultat a été la détermination de données importantes, sans lesquelles tous les efforts antérieurs seraient demeurés stériles. Parmi ceux qui se sont livrés à ces travaux citons : Cagniard de la Tour, Andrews, Regnault, Hirn, Fairbairn et Tate, Laboulaye, Tresca et quelques autres, qui ont eu pour objectif spécial le progrès de la science nouvelle. Vers le milieu du siècle actuel, cette série de données était assez complète. Deux cents ans auparavant Boyle avait découvert et publié cette loi, connue maintenant sous son nom [1] et sous celui de Mariotte [2], que la pression d'un gaz varie en raison inverse de son volume et en raison directe de sa densité. Le docteur Black et James Watt découvrirent, cent ans plus tard (1760), la chaleur latente des vapeurs, et Watt détermina la loi d'expansion de la vapeur d'eau. Dalton en Angleterre et Gay-Lussac en France montrèrent, au commencement du XIXe siècle, que tous les fluides gazeux se dilatent de fractions égales de leur volume pour des accroissements égaux de température. Watt et Robison avaient donné des tables de la force élastique de la vapeur d'eau ; et Gren avait montré qu'à la température de l'eau bouillante, la pression de ce fluide était égale à celle de l'atmosphère. Dalton, Ure et d'autres physiciens prouvèrent (1800-1818) que la loi reliant les températures et les pressions de la vapeur était exprimée par une progression géométrique ; Biot avait déjà donné une formule approchée, quand Southern en fit adopter une autre, encore en usage aujourd'hui.

En 1823, le gouvernement Français chargea une commission de faire des expériences, pour permettre de fixer la législation des chaudières et des machines à vapeur. Cette commission, composée de MM. de Prony, Arago, Girard et Dulong, détermina très exactement les températures de la vapeur sous des pressions s'élevant jusqu'à vingt-quatre

1. *New Experiments, physico-mechanical, etc., touching the spring of Air*, 1662.
2. *De la Nature de l'air*, 1676.

atmosphères et établit une formule pour calculer l'une de ces quantités en fonction de l'autre. Dix ans après, le gouvernement des États-Unis faisait faire des expériences semblables sous la direction de l'Institut Franklin.

La différence importante qui existe entre les gaz, tels que l'oxygène et l'hydrogène, et les fluides liquéfiables, tels que la vapeur d'eau et l'acide carbonique, avait été, à cette époque, signalée par Cagniard de la Tour, qui, en 1822, étudia la façon dont ils se comportent à de hautes températures et sous de très fortes pressions. Il découvrit que si une vapeur est enfermée dans un tube de verre en présence du liquide qui l'a produite, comme l'eau et sa vapeur par exemple, et si la température est élevée jusqu'à un point déterminé, la masse entière prend tout à coup un aspect uniforme, et la ligne de démarcation précédemment existante disparaît; il en concluait que l'ensemble devenait gazeux. Ce fut vers ce temps que Faraday fit connaître ses expériences, alors nouvelles, dans lesquelles il liquéfiait, en les soumettant à des pressions énormes, des gaz considérés jusque-là comme permanents. Il annonçait en même temps qu'au-dessus de certaines températures, la liquéfaction des vapeurs devient impossible, si grande que soit la pression.

Cette conclusion de Faraday fut justifiée par les recherches du docteur Andrews, qui depuis lors a continué avec succès les investigations commencées par Cagniard de la Tour, et a montré qu'en un certain point, qu'il appelle « le point critique », les propriétés des deux états fluides se fondent l'une dans l'autre et que la continuité s'établit entre eux. Avec l'acide carbonique ce phénomène se produit à une température voisine de 90° Fahrenheit ou 31° centigr., et sous la pression de 75 atmosphères, ou environ 1125 livres par pouce carré, pression qui ferait équilibre à une colonne mercurielle de 60 yards ou près de 55 mètres de hauteur. Pour l'éther la température critique est de 310° Fahrenheit, et la pression de 38 atmosphères; pour l'alcool, il faut 498° Fahr., et 120 atmosphères; pour le bisulfure de carbone, 505° Fahrenheit et 67 atmosphères; pour l'eau, la pression est trop haute pour qu'on puisse la mesurer, mais

la température est d'environ 775° Fahrenheit ou 413° cent.

Donny et Dufour ont montré que les propriétés normales des vapeurs et des liquides sont sujettes à se modifier dans certaines circonstances, comme l'avait bien avant eux (1818) observé Gay-Lussac; et ils ont signalé l'influence de ce fait sur la sécurité des chaudières à vapeur. Ils découvrirent que le point d'ébullition de l'eau peut être élevé beaucoup au-dessus de sa température ordinaire, par divers moyens, consistant à priver le liquide de l'air qu'il tient ordinairement en dissolution, et à empêcher son contact avec des surfaces rugueuses ou métalliques. En maintenant des gouttes d'eau en suspension dans un mélange d'huiles ayant à peu près la même densité, Dufour put les élever, sous la pression atmosphérique, à une température de 356° Fahrenheit (180° cent.), qui correspond, dans les conditions normales, à une pression de vapeur d'environ 150 livres par pouce carré, ou 10 atmosphères. En se fondant sur des considérations théoriques, le professeur James Thompson a indiqué qu'une action à peu près semblable peut permettre, dans certaines conditions, de refroidir la vapeur au-dessous de la température normale de condensation, sans qu'elle se liquéfie.

Fairbairn et Tate ont repris ces essais pour déterminer le volume et la température de l'eau à des pressions dépassant celles en usage dans les machines à vapeur; des déterminations incomplètes ont aussi été prises par quelques autres physiciens.

Regnault est l'autorité qui fait loi quand il s'agit des données de cet ordre. Ses expériences de 1847, exécutées aux frais du gouvernement français et sous la direction de l'Académie des sciences de France, sont d'une précision merveilleuse et s'étendent sur une très longue échelle de températures et de pressions. Après un quart de siècle les résultats en subsistent tout entiers, et on les regarde comme des modèles de recherches physiques rigoureuses [1].

1. Voir, pour la meilleure collection des tables de Regnault à la portée du public, *Porter on the steam-engine Indicator*.

D'après les recherches de Regnault, la chaleur totale de la vapeur n'est pas constante ; la chaleur latente varie et la somme des chaleurs, latente et sensible, ou chaleur totale, augmente de 0,305 de degré pour chaque accroissement d'un degré dans la chaleur sensible ; ce qui donne 0,305 pour représenter la chaleur spécifique de la vapeur saturée. Il trouva 0,4805 pour la chaleur spécifique de la vapeur surchauffée.

Regnault ne tarda pas à s'apercevoir que la vapeur ne suit pas la loi de Mariotte, et il montra que la différence est très marquée. Il exprima ses résultats non seulement au moyen de tableaux chiffrés, mais aussi par des tracés graphiques. Ensuite il détermina les constantes exactes à introduire dans l'expression algébrique de Biot :

$$\log.\, p = a - b\,A^x - c\,B^x.$$

En faisant

$$x = 20 + t^\circ \text{ cent.};\ a = 6{,}264035;\ \log.\, b = 0{,}1397743;$$

$$\log.\, c = 0{,}6924351;\ \log.\, A = \bar{1}{,}9940393,\ \text{et}\ \log.\, B = \bar{1}{,}9983439$$

p est la pression en millim. de mercure.

Dans l'expression de la chaleur totale, $H = A + b\,t$, Regnault obtint pour l'échelle centigrade $\theta = 606{,}5 + 0{,}305\, t^\circ$ cent. Pour l'échelle Fahrenheit, nous avons les expressions équivalentes suivantes :

$$H = 1123{,}7 + 0{,}305\, t^\circ \text{ Fahr. si on mesure à partir du } 0^\circ \text{ Fahr.}$$

$$\left.\begin{aligned} &= 1801{,}7 + 0{,}305\,(t-32)^\circ \text{ Fahr.} \\ &= 1081{,}94 + 0{,}305\, t^\circ \text{ Fahr.} \end{aligned}\right\} \text{si on mesure à partir du point de congélation.}$$

Pour la chaleur latente, nous avons approximativement :

$$\begin{aligned} L &= 606^\circ{,}5 - 0{,}695\, t^\circ \text{ cent.} \\ &= 1091^\circ{,}7 - 0{,}695\,(t^\circ - 32) \text{ Fahr.} \\ &= 1113^\circ{,}94 - 0{,}695\, t^\circ \text{ Fahr.} \end{aligned}$$

Depuis Regnault, rien d'important n'a été fait dans le même ordre d'idées. Il reste encore beaucoup de travail à exécuter pour étendre ces recherches aux hautes pressions, et aux conditions qui se produisent dans le fonctionnement de la machine à vapeur. Les volumes et densités de la

vapeur demandent une étude plus approfondie ; la manière dont elle se comporte dans les machines n'est encore que peu connue, si ce n'est théoriquement. La valeur exacte de l'équivalent de Joule est elle-même contestée.

Des recherches expérimentales récentes, ayant trait directement à la théorie de la machine à vapeur, ont été exécutées par Hirn ; il a trouvé, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, une valeur de moins de 2 pour 100 inférieure à celle de Joule. En 1853, et à plusieurs reprises jusqu'en 1876, Hirn a soumis à l'épreuve de l'expérience les travaux analytiques de Rankine, ce qui l'a conduit à conclure que la vapeur, travaillant par expansion, doit se liquéfier graduellement. Ayant fait construire un cylindre de machine à vapeur en verre, il parvint à voir clairement les nuages de brouillard produits par l'expansion de la vapeur en arrière du piston; tandis que les expériences de Regnault amèneraient à conclure que la vapeur devrait devenir plus sèche et surchauffée, si la chaleur n'était pas transformée en énergie mécanique. Comme on le verra ci-après, cette grande découverte de Rankine a eu sur la théorie de la machine à vapeur une influence plus décisive qu'aucune autre de celles faites pendant ce siècle. La confirmation expérimentale de Hirn se place sur le même rang que la découverte originale.

En 1858, Hirn confirma également les conclusions de Mayer et de Joule, en déterminant le travail fait et l'acide carbonique produit par des hommes employés au *treadmill*[1], en même temps que l'accroissement de température dû à leur présence ; il trouva que cet accroissement est beaucoup plus grand, relativement à la quantité d'acide carbonique produit, quand les hommes sont au repos que lorsqu'ils travaillent. Il prouva ainsi d'une manière concluante la transformation de l'énergie calorifique en travail mécanique. C'est d'après ces expériences que Helmholtz a évalué à 1/5 le rendement de la machine humaine et conclu que le

1. Litt. : moulin à marcher, appareil dont on se sert en Angleterre pour faire exécuter aux prisonniers un travail obligatoire et utilisable. (*N. du Trad.*)

cœur a un effet utile 8 fois supérieur à celui de la locomotive, résultat conforme à l'opinion émise par Rumford, qui attribuait une valeur élevée au rendement mécanique des moteurs animés.

Les expériences les plus importantes de Hirn, sur le sujet qui nous occupe, furent faites avec des machines à vapeur de grande dimension, simples ou composées, employant de la vapeur tantôt saturée et tantôt surchauffée à des températures qui atteignirent jusqu'à 340° centigr. Il détermina le travail exécuté, la quantité de chaleur qui entrait dans le cylindre et celle qui en sortait, et obtint ainsi une valeur grossièrement approchée de l'équivalent mécanique de la chaleur. Le chiffre variait de 310 à 606 kilogrammètres. Mais en tous cas la perte de chaleur due au travail fait était observée, et quoique ces recherches, par leur nature même, ne pussent pas donner de résultats quantitatifs exacts, elles n'en sont pas moins d'un grand intérêt, en ce qu'elles confirment qualitativement les théories de Mayer et de Joule, et démontrent la transformation de l'énergie.

Ainsi, comme nous l'avons vu, l'investigation expérimentale et les recherches analytiques ont concouru à la création de la science nouvelle ; et la théorie de la machine à vapeur a pris enfin une forme complète et bien définie, qui permet à l'ingénieur intelligent d'en comprendre le fonctionnement, de se rendre compte des conditions dans lesquelles elle travaille, de prévoir dans quelle direction se feront les progrès ultérieurs, et comment cette machine pourra être perfectionnée et son rendement amélioré.

Un résumé très concis des principaux faits et principes relatifs à la théorie de la machine à vapeur formera la conclusion naturelle de cette esquisse historique.

Le mot « énergie » fut employé pour la première fois par le Dr Young, pour désigner le travail d'un corps en mouvement, dans ses *Lectures sur la philosophie naturelle*, qui semblent écrites d'hier.

L'énergie est la faculté que possède un corps en mouvement de vaincre une résistance qui s'oppose à sa marche ;

on la mesure, soit en prenant le produit de la résistance moyenne par l'espace parcouru pendant qu'elle est surmontée, soit en multipliant la masse du corps par la moitié du carré de sa vitesse. L'énergie cinétique est l'énergie réelle d'un corps qui se meut; l'énergie potentielle est la mesure du travail qu'un corps est capable d'exécuter dans certaines circonstances qui, sans consommer de l'énergie, peuvent exercer sur le corps certaines actions : telles, par exemple, que la rupture d'une corde à laquelle un poids est suspendu, ou l'action d'un corps enflammé s'approchant d'une masse de substance explosive. La mesure anglaise de l'énergie est la livre-pied ; sa mesure métrique est le kilogrammètre.

Cinétique ou potentielle, l'énergie peut être, ou bien observable et résultant du mouvement d'une masse, ou bien invisible et résultant des mouvements moléculaires. L'énergie d'un corps céleste ou d'un boulet de canon d'une part, et d'autre part celle de l'action calorifique ou électrique sont des exemples rentrant dans ces deux catégories. Dans la nature nous trouvons de l'énergie potentielle utilisable dans le combustible, dans la nourriture, dans les chutes d'eau et les affinités chimiques dont nous pouvons disposer. Nous trouvons de l'énergie cinétique dans le mouvement des vents et des eaux courantes, dans le mouvement calorifique des rayons solaires, dans les courants de chaleur terrestre et dans une foule de mouvements intermittents des corps produits par l'action de forces naturelles ou artificielles qui leur sont appliquées. Nous avons déjà vu que l'énergie potentielle du combustible et de la nourriture a été empruntée jadis à l'énergie cinétique des rayons du soleil, qui s'y est incorporée et emmagasinée. On voit également que le système animal n'est qu'un simple « mécanisme de transmission » de l'énergie, qu'il ne crée pas l'énergie, mais ne fait que la communiquer dans telle direction qu'il désire.

Il est facile de ramener toutes les formes d'énergie utilisables à une origine commune : l'énergie potentielle d'un univers de matière nébuleuse (chaos); cette substance,

d'une densité infiniment faible et infiniment diffusée, possédait une « énergie de position » qui a subi, depuis la création, une transformation graduelle dans les différentes formes d'énergie cinétique et potentielle ci-dessus rappelées, en passant par les modes intermédiaires qui sont encore en partie sous nos yeux : énergie potentielle de l'affinité chimique, énergie cinétique de la radiation solaire, de la rotation et de la chaleur centrale de la terre.

La *mesure* d'une quantité donnée d'énergie, quelle qu'en soit la forme, est le produit de la résistance R qu'elle est capable de surmonter par le chemin S qu'elle peut parcourir à l'encontre de cette résistance, et son expression est R S; ou bien on la mesure par les expressions équivalentes : $\frac{1}{2}$ M V² ou $\frac{P\ V^2}{2\ g}$, dans lesquelles P est le poids, M la « masse » de la matière en mouvement, V la vitesse et g la mesure dynamique de la gravité, soit 32 1/2 pieds ou $9^{m},81$ par seconde.

Il existe trois grandes lois de l'énergétique :

1° La somme totale d'énergie existant dans l'univers est invariable.

2° Les différentes formes d'énergie peuvent se transformer l'une dans l'autre et possèdent une équivalence quantitative exacte.

3° Toutes les formes d'énergie cinétique tendent continuellement à se réduire à des mouvements moléculaires, et finalement à se répartir uniformément dans l'espace.

Nous avons déjà fait l'histoire des deux premières de ces lois. La troisième fut énoncée pour la première fois par le professeur sir William Thomson en 1853. L'énergie non dissipée est appelée par lui « entrophie ».

La science de la thermodynamique est, comme on l'a dit, une branche de l'énergétique et la seule, dans le domaine du physicien, qui ait été bien étudiée. Cette science, restreinte à la considération des rapports de l'énergie calorifique à l'énergie mécanique, est basée sur le grand fait établi par Rumford et Joule, et traite des modes d'ac-

tion des fluides, qui, dans les machines thermiques, servent d'intermédiaires pour les transformations de l'énergie. Telle qu'elle est acceptée maintenant, elle admet la théorie dynamique des fluides, et suppose que leur force expansive est due au mouvement de leurs molécules.

Cette idée est aussi vieille que Lucrèce et fut nettement énoncée par Bernouilli, Le Sage et Prévost, et Herapath. Joule rappela l'attention sur elle en 1848, en observant qu'elle explique la pression des gaz par le choc de leurs molécules sur les parois des vases qui les contiennent. Dix ans plus tard, Helmholtz donna de beaux développements mathématiques à la théorie des milieux, en les supposant composés de particules mobiles sans frottement, et Clausius poussa ce travail encore plus loin.

La conception générale d'un gaz acceptée aujourd'hui et renfermant la théorie des tourbillons atomiques de Thomson et Rankine s'appuie sur cette hypothèse, que tous les corps se composent d'une infinité de petites parties appelées molécules, dont chacune est une agrégation chimique d'éléments constituants ou atomes. Ces molécules sont dans un état d'agitation continuelle, qu'on appelle le mouvement calorifique. Plus haute est la température, plus violente est cette agitation ; ce mouvement se mesure, en tant que force vive, par le demi-produit de la masse par le carré de la vitesse du mouvement moléculaire, ou, en unités de chaleur, par le même produit divisé par l'équivalent de Joule. Dans les solides, l'étendue du mouvement est circonscrite, et il ne peut se produire de changement de forme. Dans les fluides, le mouvement des molécules est devenu assez violent pour leur faire franchir ces limites et son étendue n'est plus restreinte d'une manière définie.

Les lois de la thermodynamique sont, d'après Rankine :

1° L'énergie calorifique et l'énergie mécanique peuvent se transformer mutuellement l'une dans l'autre; une unité thermique anglaise étant l'équivalent en énergie calorifique de 772 livres-pieds d'énergie mécanique, et une *calorie*

métrique correspondant à 423,55 kilogrammètres de travail.

2° L'énergie correspondant à la chaleur de chacune des parties égales dans lesquelles on peut diviser une substance uniformément chaude, est la même; et l'énergie calorifique totale de la masse est égale à la somme des énergies de ses parties[1].

Il s'ensuit que le travail accompli par la transformation de l'énergie calorifique, pendant une variation infiniment petite de la température d'une substance, a pour mesure le produit de la température absolue par la différentielle d'une certaine fonction; et cette différentielle n'est autre chose que le rapport du travail développé à la température absolue. Cette fonction est ce que Rankine a appelé le potentiel calorifique de la substance pour le genre de travail considéré. Une autre fonction, comprenant la variation de chaleur totale, tant celle transformée que celle nécessaire pour produire les changements physiques indispensables à la transformation, a reçu le nom de « fonction thermodynamique ». L'expression donnée par Rankine pour l'équation générale de la thermodynamique, renferme cette dernière fonction, et se pose comme il suit ;

$$\mathrm{J}\,dh = d\mathrm{H} = k\,d\tau + \tau\,d\mathrm{F} = \tau\,d\varphi.$$

J est l'équivalent de Joule, dh la variation de la chaleur totale de la substance, $k\,d\tau$, le produit de la « chaleur spécifique dynamique » par la variation de température, ou la chaleur totale nécessaire pour produire des changements autres qu'une transformation d'énergie; $\tau\,d\mathrm{F}$ est le travail résultant de la transformation d'énergie calorifique, ou le produit de la température absolue τ, par la différentielle du potentiel calorifique; φ est la fonction thermodynamique et $\tau\,d\varphi$ mesure la chaleur totale nécessaire pour produire une certaine quantité de travail ou d'énergie mécanique et modifier simultanément la température de la substance.

1. Cette uniformité cesse d'exister si la substance change d'état physique en dégageant son énergie calorifique : c'est ce qui arrive pour la vapeur travaillant par détente.

En étudiant la façon dont se comportent les fluides élastiques, on arrive à ce résultat : que le travail qu'ils développent en agissant, comme la vapeur d'eau, dans les machines thermiques, se compose de trois parties :

1° Une variation du mouvement calorifique actuel du fluide;

2° La chaleur dépensée pour la production du travail interne;

3° La chaleur dépensée pour produire le travail extérieur d'expansion.

Toutes les fois que la chaleur totale dépensée surpasse celle nécessaire à la production du travail sur les corps extérieurs, l'excès ainsi fourni est autant d'ajouté à l'énergie intérieure de la substance qui l'absorbe.

L'application de ces principes au travail du fluide dans la machine à vapeur est un progrès relativement récent dans la théorie de cette machine; c'est à Rankine que nous devons le premier et, jusqu'à présent, le seul traité où ces principes, aujourd'hui acceptés, soient exposés avec ampleur et, sous quelques rapports, d'une manière complète.

Il s'écoula quinze ans entre la publication de la première théorie logique de la machine à vapeur par de Pambour[1], et le jour où Rankine, en 1859, nous donna le plus précieux de tous ses ouvrages : *The Steam Engine and other prime movers* (La machine à vapeur et autres machines à pression). L'ouvrage serait très obscur pour le public, et la lecture en est même difficile pour des ingénieurs instruits. Néanmoins le traité sur la thermodynamique des machines thermiques est de la plus haute valeur. Ce sera une tâche de longue haleine que d'étendre l'application des lois qu'il a mises en lumière et de mettre les résultats de ses travaux sous les yeux des commençants, sous une forme facile à saisir.

Le nom de William-J. Macquorn Rankine, ingénieur et physicien Écossais, demeurera à jamais inscrit dans les

1. *Théorie de la machine à vapeur*, par le chevalier F.-M.-G. de Pambour; Paris, 1844.

annales de la science; il fut le créateur de la théorie moderne de la machine à vapeur; il jeta les bases de la thermodynamique. Il est mort jeune encore, le 24 décembre 1852, à l'âge de cinquante-deux ans, alors qu'il occupait la chaire de construction à l'Université de Glasgow. Ce fut là une des pertes les plus grandes qu'aient éprouvées la science et le génie civil dans le cours de ce siècle.



LIVRE VIII

APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE A LA MACHINE A VAPEUR

« Souvent une incertitude entravait notre ardeur joyeuse, mais la persévérance domptait la difficulté, et ce nouveau triomphe nous rendait le cœur plus fort. » — RALEIGH.

« Si nous appelons monstres, ou miracles, ce où nostre raison ne peult aller, combien s'en présente-t-il continuellement à nostre veue?... Mais aussi de l'aultre part, c'est une sotte presumption d'aller desdaignant et condamnant pour faulx ce qui ne nous semble pas vraysemblable... Point de plus notable folie au monde que de les ramener à la mesure de nostre capacité et de nostre suffisance... » — MONTAIGNE.

« Ceux qui aspirent avec énergie à la perfection en approcheront davantage que ceux qui, par paresse ou découragement, renoncent à l'atteindre, parce qu'elle leur semble inaccessible. » — CHESTERFIELD.

Ainsi qu'on l'a vu ci-dessus, la machine à vapeur est un appareil spécialement destiné à transformer l'énergie latente ou potentielle, en énergie cinétique, active et utilisable.

Il y a des millions d'années, dans cette première période que les géologues appellent carbonifère, l'énergie cinétique des rayons solaires et du noyau brûlant du globe terrestre se dépensait à décomposer les masses énormes d'acide carbonique dont l'air était alors chargé, et à produire, en même temps qu'une atmosphère propre à la vie, les immenses forêts qui couvraient la terre de leur végétation luxuriante. C'est alors que se constituèrent, au profit de la race humaine, qui n'existait pas encore, ces immenses réserves d'énergie potentielle, dont nous commençons à peine à tirer parti. Cette énergie potentielle devient cinétique et disponible, toutes les fois que l'affinité puissante

du charbon pour l'oxygène est mise en jeu; et le combustible fossile, emmagasiné dans nos mines de charbon ou le bois de nos forêts, retourne, par le procédé bien connu de la combustion, à cet état de combinaison avec l'oxygène, dans lequel il était engagé dans les premiers temps géologiques.

La théorie thermodynamique de la machine à vapeur a pour objet d'étudier les modifications qui se succèdent depuis le moment où, dans le foyer de la chaudière, cette énergie potentielle, qui existe dans la tendance du charbon et de l'oxygène à se combiner sous forme d'acide carbonique, est mise à profit pour dégager, en quantité équivalente, l'énergie cinétique de la chaleur, jusqu'à l'application finale de l'énergie mécanique résultante au mécanisme de transmission, par lequel elle est utilement employée à élever de l'eau, à faire marcher les usines et outils de toutes sortes, à remorquer les trains éclairs[1] sur nos railways, ou à pousser le Great-Eastern à travers l'Océan.

De l'énergie calorifique cinétique développée dans le foyer, une partie est transmise à l'intérieur de la chaudière à travers ses parois métalliques, pour vaporiser le liquide qu'elle contient, et prendre la nouvelle forme d'énergie qui se retrouve dans la vapeur confinée sous pression; le surplus est entraîné dans l'atmosphère, avec les produits de la combustion, et n'a d'autre effet utile que de déterminer le tirage.

La vapeur, avec l'énergie calorifique qu'elle renferme, se rend, en passant par les conduites et lumières, au cylindre de la machine, et n'y parvient qu'après avoir perdu dans ce trajet une fraction plus ou moins forte de la chaleur qu'elle contenait; arrivée là, elle se détend en poussant le piston devant elle et se refroidit encore par la transformation d'une partie de son énergie calorifique, équivalente au travail mécanique qu'elle accomplit. Mais

1. C'est le nom donné à certains trains spéciaux, lancés avec une vitesse exceptionnelle, d'un bout à l'autre du grand Transcontinental Américain. *(N. du Trad.)*

le cylindre est en métal; cette substance éminemment conductrice convient aussi mal que possible pour renfermer la chaleur, cette chose si subtile, si difficile à retenir, surtout lorsqu'elle est répandue dans un fluide liquéfiable comme la vapeur. Les condensations internes et revaporisations, qui sont la plaie du travail économique, ont donc beau jeu pour se produire; elles ne trouvent d'ailleurs qu'un obstacle insuffisant dans la chemise de vapeur, qui, en réchauffant la paroi du cylindre, soutient la température de sa surface intérieure et empêche le premier phénomène, la condensation, préliminaire essentiel de la perte finale par revaporisation. Le piston aussi est en métal et offre ainsi un passage très facile à la chaleur dans la direction de l'échappement.

Enfin toute la chaleur inutilisée est rejetée du cylindre et perdue pour la machine, qu'elle soit emportée par l'eau de condensation, ou, dans les machines sans condenseur, par l'atmosphère dans laquelle elle se disperse.

D'après cet exposé du jeu d'une machine à vapeur, il est aisé de découvrir à quels principes s'adresse sa théorie, de reconnaître les faits qui peuvent influer sur sa marche, de déterminer dans quelle direction il convient de chercher à l'améliorer, dans quelles limites ces améliorations sont forcément enfermées, et même, dans certains cas, de choisir la méthode qui permettra de les réaliser.

Il est facile de constater l'allure générale du progrès dans le passé aussi bien que dans le présent, et lorsqu'on rencontre une piste bien nette, qui a été suivie depuis longtemps et avec persévérance, on peut admettre d'ordinaire qu'elle ne se détournera pas brusquement. Nous pouvons par conséquent nous former une idée de la voie dans laquelle nous avons chance de trouver le progrès d'ici à un avenir prochain.

En passant en revue les opérations qui s'effectuent dans la machine à vapeur pendant la transformation d'énergie que nous avons esquissée, et en l'étudiant plus en détail, nous pouvons dégager les principes qui doivent présider à l'établissement et à la construction de cette machine, nous

guider dans son maniement et déterminer son rendement.

Dans le foyer de la chaudière, la quantité de chaleur développée sous une forme utilisable est proportionnelle à celle du combustible brûlé ; et elle est utilisable en proportion de la température atteinte par les produits de la combustion; si cette température n'était pas plus élevée que celle de la chaudière, la chaleur tout entière se disperserait sans produire aucun effet utile. Mais la température développée par une quantité donnée de chaleur mesurée en unités thermiques est d'autant plus élevée que le volume de gaz échauffé est moindre. Par suite, au point de vue qui nous occupe, il faudrait que la combustion eût lieu avec le moins d'air possible, et fût terminée avant que la chaleur fût soustraite aux flammes. Une haute température au foyer est aussi une garantie de bonne combustion. Nous concluons de là que, dans le foyer d'une chaudière à vapeur, le combustible devrait être brûlé complètement dans une chambre à parois non conductrices, avec la plus faible quantité d'air compatible avec une parfaite combustion; que, de plus, l'air devrait être exempt d'humidité, l'absorbant le plus énergique de la chaleur, et que les produits de la combustion devraient être éloignés du foyer avant qu'ils ne commencent à transmettre leur chaleur à la chaudière. Un foyer en briques réfractaires, une vaste chambre de combustion avec mélange intime des gaz qui la remplissent, de bon combustible, une alimentation d'air restreinte et soigneusement distribuée semblent être les meilleurs moyens de satisfaire à ces conditions.

La chaleur, engendrée par la combustion, traverse les parois qui séparent les gaz du foyer de l'eau et de la vapeur contenues dans la chaudière; elle se trouve alors absorbée par ces fluides et les porte de la température de l'eau d'alimentation à la température correspondant à la pression de la vapeur ; non seulement elle échauffe le liquide, mais encore elle le transforme en vapeur, et cette transformation, accompagnée d'une dilatation énorme, correspond à une production de travail.

La proportion dans laquelle la chaleur peut être enlevée

utilement aux gaz du foyer dépend de la conductibilité de la paroi métallique, de la facilité avec laquelle elle transmet la chaleur à l'eau, et de la différence de température entre les deux faces de cette paroi. Par conséquent une surface de chauffe considérable, un métal bon conducteur et une différence maximum de température entre les deux faces de la tôle sont des conditions essentielles d'économie.

On donne parfois à la surface de chauffe une étendue telle, que la température des gaz à leur sortie est trop basse pour assurer un bon tirage; c'est alors qu'intervient le tirage artificiel, obtenu souvent par des ventilateurs, méthode excellente au point de vue du rendement.

La chaudière est généralement en fer forgé, quelquefois, mais rarement, en fonte. L'acier doux, non susceptible de trempe, est encore préférable; il est plus tenace, plus homogène et meilleur conducteur. Avec un métal donné, on facilite la transmission de la chaleur, en donnant à la chaudière une forme telle que la circulation de l'eau y soit rapide, constante et complète.

Pour assurer l'absorption aussi parfaite que possible de la chaleur, il convient d'introduire l'eau d'alimentation tout près du point où les gaz se rendent dans la cheminée, de placer la prise de vapeur vers le point où la température des carneaux est la plus élevée, et de faire courir l'eau et les fumées en sens opposés. Les pertes de chaleur de la chaudière par conductibilité et rayonnement sont atténuées par l'emploi d'enveloppes isolantes.

L'équivalent mécanique de la chaleur engendrée dans la chaudière est facile à calculer, quand les conditions du fonctionnement de la machine sont connues. On sait qu'une livre de carbone pur peut dégager, par sa transformation complète en acide carbonique, 14,500 unités thermiques anglaises, équivalant à 14,500 × 772 = 11,194,000 livres-pieds de travail, quantité qui, ramenée à une durée d'une heure, correspond à $\frac{11194000}{1980000}$ = 5,6 chevaux de force. En d'autres termes, avec une utilisation parfaite de la chaleur, il ne faudrait que $\frac{10}{56}$ = 0,177 ou 1/6 environ de livre de

carbone par heure et par cheval. Mais la meilleure houille n'est pas à beaucoup près du carbone pur, et ne possède qu'environ les 9/10 du pouvoir calorifique de ce corps. On admet généralement que la houille peut fournir environ 10,000,000 de livres-pieds de travail par livre. Le pouvoir de vaporisation du carbone pur étant estimé à 15 livres d'eau par livre de combustible, celui de la bonne houille peut être évalué à 13 1/2. En mesures métriques, un kilogramme de bon charbon transformerait en vapeur sensiblement 13 1/2 kilogrammes d'eau amenée à la température d'ébullition, en produisant 7,272 calories, l'équivalent d'environ 3,000,000 de kilogrammètres de travail. Un gramme de carbone pur produit, par sa combustion, 8,080 calories. Il suffirait de 0.08 kilog., ou moins de 1/12 de kilogramme de carbone pur brûlé par heure, pour développer une énergie calorique équivalant à la force d'un cheval.

Il arrive rarement que plus des trois-quarts du charbon brûlé sous une chaudière soient utilement employés à la production de la vapeur. On peut donc évaluer au plus à 7,500,000 livres-pieds (1,036,898 kilogrammètres) l'énergie fournie à la machine par livre de bon charbon brûlée. Le rendement d'une bonne chaudière ne dépasse donc pas le chiffre de 0,75. Rankine évalue cette quantité, pour des chaudières ordinaires bien établies et avec tirage naturel, à

$$E = \frac{0.92}{1 + 0.5\frac{F}{S}};$$

$\frac{F}{S}$, étant le rapport du poids de combustible brûlé par heure à la surface de chauffe. Cette formule donne une approximation convenable dans la pratique.

En arrivant dans la machine, la vapeur pousse d'abord le piston à pleine pression, avant la fermeture de l'admission : ensuite elle se détend, et par conséquent se condense progressivement, en proportion du travail d'expansion ; finalement elle s'échappe du cylindre. La vapeur saturée, comme on l'a vu plus haut, se condense sur les parois du

cylindre au commencement de la course du piston; elle se revaporise vers la fin, et emporte au condenseur une quantité de chaleur importante, qui aurait dû être utilisée pour produire de la force. Si ces opérations s'effectuent dans deux cylindres, au lieu d'un seul, l'effet ainsi obtenu est de modifier les pertes par la conductibilité, par rayonnement, par condensations et revaporisations, et par frottements. Nous avons déjà dit quelle influence considérable peut avoir dans ce sens la substitution de la machine *compound* à la machine à cylindre unique.

Les lois de la thermodynamique enseignent, comme on l'a vu plus haut, qu'une fraction de l'énergie-calorique contenue dans la vapeur ou autre fluide moteur est transformée en énergie mécanique, et que la valeur de cette fraction est :

$$\frac{H_1 - H_2}{H_1}$$

H_1 et H_2 étant les quantités de chaleur, contenues dans la vapeur au commencement et à la fin de son action, mesurées à partir du zéro absolu du mouvement calorique. Dans les gaz parfaits, on a

$$\frac{H_1 - H_2}{H_1} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + 461^\circ.2 \text{ Fahr.}};$$

Dans les gaz imparfaits, et surtout dans les fluides qui, comme la vapeur d'eau, se condensent ou subissent d'autres modifications dans leur état physique, cette égalité n'existe pas; mais ces fluides, employés dans une machine thermique, n'ont pas un rendement moins élevé que celui du gaz parfait. Dans tous les cas, on voit que le rendement est maximum quand la chaleur totale est reçue à une température aussi élevée, et abandonnée à une température aussi basse que possible.

Si l'équation ci-dessus était rigoureusement exacte, une machine à air chaud, travaillant entre 413°,6 Fahr., soit 874°,8 de température absolue, et 122° Fahr. ou 583°,2 absolus, aurait un rendement de 0,263; ce chiffre représentant la fraction de chaleur utilisable qu'elle transformerait

en travail mécanique. Les machines du steamer *Ericsson* approchaient beaucoup de ce chiffre, et donnaient une force d'un cheval pour une dépense de 1,87 livre de charbon par heure.

La loi de l'expansion de la vapeur varie dans de larges proportions, suivant les conditions dans lesquelles elle s'effectue. Si, pendant la détente, la vapeur n'emprunte ni ne communique de chaleur aux corps environnants, la loi d'expansion est représentée par une hyperbole, et la pression baisse bien plus rapidement que dans le cas de l'expansion sans travail extérieur; il y a à la fois changement de volume et condensation partielle. L'expression algébrique qui correspond à ce mode d'expansion est, suivant Rankine :

$$P V^{1.111} = \text{Const.};$$

selon d'autres autorités, elle serait comprise entre :

$$P V^{1.135} = \text{Const. et } P V^{1.333} = \text{Const.}$$

Plus la valeur de l'exposant de V est élevée, plus est grand le travail développé entre deux températures données. La valeur maximum correspond au cas où la vapeur est saturée, mais parfaitement sèche au commencement de son expansion. Les pertes dues à la condensation au début de la course, sur la paroi froide du cylindre, et à la revaporisation subséquente au fur et à mesure de l'expansion, diminuent quand le cylindre est maintenu chaud par une chemise de vapeur, et quand la durée de cet échange de chaleur entre la vapeur et le métal est réduite.

On peut donc dire que, tout considéré, les pertes de chaleur dans le cylindre sont aussi faibles que possible, quand la vapeur y entre sèche ou modérément surchauffée, quand les surfaces intérieures sont maintenues chaudes par la chemise de vapeur, ou par l'enveloppe d'air chaud qu'on lui substitue quelquefois, et quand la vitesse du piston et celle de rotation sont très grandes[1]. Les meil-

1. Dans quelques cas, comme dans la machine Allen, la vitesse du piston a été portée à près de 800 $\sqrt[3]{\text{longueur de course}}$ en pieds par minute ou $7^m,30 \sqrt[3]{\text{longueur de course}}$ en mètres par seconde.

leures machines *compound* à condensation, marchant à la pression de 75 livres au pouce carré, demandent habituellement 2 livres environ de charbon par heure — soit 20,000,000 de livres-pieds d'énergie dans le foyer — pour développer une force d'un cheval; c'est-à-dire qu'elles absorbent à peu près dix fois l'équivalent en chaleur du travail mécanique qu'elles produisent. Si l'expansion de la vapeur se faisait comme celle des gaz permanents, ces machines auraient un rendement théorique d'environ un quart, tandis qu'en réalité il n'est que d'un sixième. Par conséquent, même pour les meilleurs types en usage, la machine à vapeur n'utilise guère que les six dixièmes de l'énergie calorique théoriquement utilisable. La plus grande partie, presque la totalité des cinq sixièmes perdus, est entraînée par la vapeur d'échappement.

La puissance mécanique communiquée aux organes de la machine par l'énergie cinétique de la vapeur chaude agissant sur le piston, est finalement appliquée d'une manière utile au système de transmission quelconque qui rattache la machine au mécanisme qu'elle fait mouvoir. Dans ce transport de l'énergie, une partie est absorbée par les frottements dans la machine elle-même. L'étendue de cette perte est extrêmement variable, et il est possible de la rendre très petite dans une machine bien disposée, bien construite et bien manœuvrée. On peut l'évaluer à une demi-livre par pouce carré de piston pour de bonnes machines de 100 chevaux et au-dessus; mais dans celles de très petite dimension, elle est souvent de plusieurs livres. Le frottement est atténué quand les deux surfaces frottantes sont de matières différentes, l'une et l'autre d'un métal dur, uni, à grain serré, quand elles sont bien lubrifiées, et que les organes sont disposés de telle sorte que les diverses forces s'équilibrent en partie, comme cela a lieu sur les coussinets des machines à deux ou trois manivelles. Dans une machine à vapeur de grande dimension et bien disposée, la perte due au frottement est ordinairement de 5 et 7 0/0 de la puissance développée. Elle augmente rapidement quand les dimensions décroissent.

Dans les pages qui précèdent, nous avons raconté, peut-être un peu minutieusement, l'histoire du développement de la machine à vapeur, depuis le commencement de l'ère chrétienne jusqu'à nos jours; puis, rapidement esquissé le développement, graduel aussi, quoique intermittent, de la théorie de cette machine merveilleuse, et montré comment les principes de la science trouvent leur application dans son fonctionnement. Nous sommes maintenant préparés à étudier les règles que doit observer le constructeur intelligent et à entendre les conseils que nous donnent la science et l'expérience, sur les conditions essentielles à remplir pour obtenir un rendement élevé de la vapeur et l'économie dans la consommation du combustible. Nous pourrons même essayer de poser des jalons précis sur la voie que suit aujourd'hui le progrès, en nous guidant sur l'étude de ces conditions, fixer les limites qu'aucun perfectionnement ne permettra jamais de dépasser, et peut-être deviner par quels artifices on parviendra à franchir la barrière qui borne la carrière à parcourir, et qui semble infranchissable tant qu'on restera attaché aux types actuels de machines.

Il nous faut, en premier lieu, examiner la question suivante : *Quel est, sous sa forme la plus précise et la plus générale, le problème que les ingénieurs ont essayé de résoudre jusqu'ici?*

Ce problème une fois posé, nous étudierons l'histoire, dans le but de déterminer dans quelle direction ont marché jusqu'à présent les perfectionnements, et afin de dégager les conditions qui doivent régir la construction de la machine à vapeur, telle qu'elle est constituée actuellement. Puis nous appuyant sur le passé pour prévoir l'avenir, nous essaierons de discerner la voie qui promet le succès pour aujourd'hui ou pour demain; enfin nous rechercherons quelles sont les conditions physiques et intellectuelles qui semblent devoir nous conduire aux meilleurs résultats.

Voici comment peut être énoncé, dans sa forme définitive et la plus générale, ce problème capital :

Construire une machine qui transforme le plus parfaite-

ment possible l'énergie cinétique de la chaleur en puissance mécanique; cette chaleur étant obtenue par la combustion, et la vapeur étant l'agent qui la reçoit et la transmet.

Ce problème, comme nous l'avons déjà vu, comporte deux questions distinctes et d'égale importance :

1° Quels sont les principes scientifiques impliqués dans le problème, tel qu'il est posé?

2° Comment doit être construite une machine, en concordance avec ces principes scientifiques, qui soit l'incarnation la plus parfaite, non seulement de ces principes, mais encore de toutes les règles de la mécanique pratique, dont l'influence est de premier ordre sur la valeur économique de tout mécanisme?

La première question s'adresse au savant, la seconde à l'ingénieur. Pour y répondre d'une manière satisfaisante, même dans les limites que nos connaissances actuelles comportent, il faut avoir étudié soigneusement, à la lumière la plus vive dont la science nous éclaire, les principes scientifiques impliqués dans la théorie de la machine à vapeur, et, non moins attentivement, les étapes successives des progrès accomplis, ainsi que les variations de structure qui les ont accompagnés; il faut avoir analysé les effets de chaque modification et en avoir recherché les motifs.

La théorie de la machine à vapeur est un sujet trop vaste et trop important pour pouvoir être abordé même de la manière la plus sommaire. Je ne puis qu'essayer d'exposer la marche qui semble indiquée par la science comme la plus utile à suivre, pour qui cherche des moyens d'augmenter la puissance et l'économie des machines.

La science nous enseigne que, *dans tous les cas, nous réussirons d'autant mieux à tirer économiquement la force mécanique de l'énergie du mouvement calorique, que nous opérerons entre des limites de température plus écartées, et que nous saurons mieux empêcher la chaleur de se disperser sans produire d'effet utile.*

Il existe, comme on l'a vu, dans toutes les machines thermiques, et notamment dans les machines à vapeur, une cause inévitable de perte de travail : c'est que la tempé-

rature inférieure du cycle décrit ne peut descendre au-dessous d'une limite fort éloignée du zéro absolu, du point auquel tout mouvement calorique a disparu; cette limite, c'est la température moyenne de la surface de la terre.

En vertu des principes de la thermodynamique, la machine sera d'autant meilleure que la température de la vapeur sera plus élevée à l'admission et plus basse à l'échappement, toutes pertes de chaleur ou de travail étant supposées écartées.

Cela posé, jetons un coup d'œil sur l'histoire de la machine à vapeur et rappelons rapidement les perfectionnements principaux, les changements de forme les plus saillants; nous pourrons nous faire ainsi quelque idée de la direction générale dans laquelle nous aurons à chercher les progrès ultérieurs.

Nous ne remonterons qu'à la machine de Porta, qui inaugure une période de travaux non interrompus; cette machine comporte un récipient unique, accomplissant à lui seul les fonctions si diverses de tous les organes des machines d'épuisement modernes : c'est à la fois une chaudière, un cylindre, un condenseur, en même temps qu'une pompe aspirante et foulante.

Le marquis de Worcester divise la machine en deux parties, par l'emploi d'une chaudière séparée.

Savery double cette partie de la machine de Worcester, qui remplissait les rôles multiples de pompe, de cylindre et de condenseur, et y applique l'eau froide pour activer la condensation.

Bientôt Newcomen et Cawley séparent la pompe de la machine proprement dite, et créent ainsi la machine à vapeur moderne, la machine composée. Dans leur dispositif, comme dans celui de Savery, nous remarquons la condensation par surface d'abord, puis l'injection d'eau froide au milieu de la vapeur à condenser.

Watt enfin couronne l'œuvre de perfectionnement et achève le mouvement progressif de spécialisation des organes, en séparant le condenseur du cylindre. Ce procédé de transformation cesse alors de se développer; les

diverses opérations importantes de la machine à vapeur se font désormais chacune dans un récipient distinct. La chaudière produit la vapeur, le cylindre en tire la puissance mécanique, et finalement, la condensation a lieu dans un vase spécial; tandis que la force qui a été dégagée dans le cylindre, est transmise par d'autres organes, soit à des pompes, soit à un outil quelconque.

Watt prend aussi l'initiative de perfectionnements d'une autre nature. Il s'efforce d'augmenter le rendement, en améliorant les proportions des organes et le travail des matériaux; il étudie avec soin les détails d'exécution, dont l'importance est si grande dans le fonctionnement des machines et qui demandent une habileté de main toute spéciale.

Watt et ses contemporains commencent enfin à entrer dans la voie des hautes pressions et des larges détentes, qui constituent le caractère le plus frappant dans les derniers progrès de la machine à vapeur. Newcomen n'employait la vapeur qu'à une pression à peine supérieure à celle de l'atmosphère, et élevait 105,000 livres d'eau à un pied de haut, en brûlant une livre de charbon. Smeaton avait augmentée un peu la pression et beaucoup accru le rendement. Watt débuta avec un rendement double de celui de Newcomen, et obtint 320,000 livres-pieds par livre de charbon, en employant la vapeur à la pression de 10 livres. Aujourd'hui les machines de Cornouailles, établies sur le même plan général que celles de Watt, mais animées par de la vapeur à 40 ou 60 livres de pression, avec détente au 1/3 ou au 1/4, font un travail qui peut s'élever en moyenne à 600,000 livres-pieds par livre de charbon brûlé. La machine d'épuisement du système *Compound* atteint même le chiffre d'environ 1,000,000[1].

1. Voici la traduction en mesures métriques des chiffres ci-dessus:

	105,000 —	320,000 —	600,000 —	1,000,000
livres-pieds par livre de charbon consommé, correspondent à une consommation de. . .	8^k,40 —	2^k,90 —	1^k,50 —	0^k,90

de houille par heure et par force de cheval. *(N. du trad.)*

L'augmentation des pressions et de la détente, qui s'est accusée depuis Watt, a été accompagnée de progrès considérables et d'un ordre différent. L'exécution matérielle des organes est devenue plus parfaite, grâce surtout aux machines-outils, qui sont aujourd'hui très perfectionnées et d'un usage général; l'installation des machines et chaudières est faite avec plus d'habileté et d'intelligence ; la vitesse du piston a été augmentée; on a soin d'avoir de la vapeur sèche, et d'empêcher les condensations jusqu'à la sortie du cylindre, soit par la chemise de vapeur, soit par la surchauffe, soit par une combinaison de ces deux systèmes ; à ces précautions est venue s'ajouter une attention plus scrupuleuse à éviter les pertes de chaleur par rayonnement et conductibilité. Enfin nous nous servons aujourd'hui de la machine *compound* ou à double cylindre, pour économiser une partie de la chaleur habituellement perdue par l'effet de la condensation interne et de la revaporisation, ainsi que par la précipitation de vapeur condensée qu'amène une grande détente.

Il y a, dans l'échelle des températures, une limite assez bien définie, au-dessous de laquelle nous ne pouvons espérer de descendre ; mais, si l'on cherche à augmenter l'écart des températures extrêmes, il est clair qu'il y a plus d'avantage à gagner un degré sur la température inférieure que sur la température supérieure[1].

La tentative faite il y a vingt-cinq ans par l'ingénieur français Du Tremblay, et renouvelée depuis par d'autres inventeurs, pour utiliser une plus grande proportion de chaleur, en se rapprochant davantage de la limite infé-

1. On s'en rend aisément compte : supposons, par exemple, une machine alimentée par de la vapeur à la température de 400° au-dessus du zéro absolu et l'utilisant sans perte jusqu'à une température de 200°. Admettons qu'un inventeur dispose cette machine de façon à lui faire employer la vapeur entre 500° et 200°, et qu'un autre, les précautions prises contre les pertes étant les mêmes, la fasse travailler entre les limites de 400° et 100°; soit le même écart, mais autour d'une moyenne plus basse. Dans le premier cas, le rendement était de 1/2, dans le second il devient 3/5, dansle dernier il atteint 3/4; c'est celui qui nous donne le meilleur résultat.

rieure, était conforme aux principes scientifiques aujourd'hui connus.

Nous pouvons résumer comme il suit, le résultat de cette étude sur le développement progressif de la machine à vapeur :

1° Le progrès a tout d'abord procédé par spécialisation; le nombre des organes a été continuellement augmenté, en même temps que la tâche de chacun d'eux se simplifiait, chaque organe étant affecté à une opération distincte.

2° Une sorte de travail secondaire de spécialisation a succédé au précédent : une même opération commencée dans une partie de la machine va se terminer dans une autre. Nous en avons des exemples dans les deux cylindres de la machine *compound* et de la machine à vapeur d'éther.

3° La voie suivie par le progrès a été signalée par une augmentation continuelle de la pression, de la détente et de la vitesse du piston, par les soins apportés pour obtenir de la vapeur sèche et éviter les pertes de chaleur par conductibilité ou rayonnement, et, dans les machines marines, par l'emploi de la condensation par surface.

Dans quelle direction doivent se faire les nouveaux progrès à espérer? Les principes scientifiques, aussi bien que les données qui ressortent du résumé qui précède, semblent nous indiquer clairement la voie : il faut augmenter autant que possible l'écart des températures. La vapeur doit entrer dans la machine à la température la plus élevée possible, être mise à l'abri des déperditions et ne conserver à l'échappement que la quantité minimum de chaleur. Celui dont le génie inventif ou l'habileté mécanique permettront, soit d'employer avec sécurité et sans perte de la vapeur à plus forte pression, soit de diminuer la température du fluide expulsé, aura bien mérité de l'humanité.

En entrant dans le détail, on reconnaît que les tendances sont aujourd'hui et seront sans doute encore assez longtemps les suivantes :

Pour ce qui concerne les machines, pressions élevées,

large détente dans plusieurs cylindres, chemise de vapeur, surchauffe, enveloppes isolantes soigneusement établies, grande vitesse de piston.

Pour ce qui concerne les chaudières, combustion complète sans excès d'air, transmission plus parfaite de la chaleur des fumées. Peut-être sera-t-on amené, pour satisfaire à ce dernier desidératum, à substituer le soufflage mécanique au tirage naturel, qui laisse perdre tant de chaleur par la cheminée.

Pour ce qui concerne la construction, emploi de matériaux de meilleure qualité, travail d'exécution plus soigné, surtout dans la chaudière, et perfectionnements nombreux dans les formes et les proportions des organes.

Pour ce qui concerne la conduite, le champ des améliorations à introduire est immense, et nous pouvons être assurés qu'on ne tardera pas à s'y engager; on comprend nettement aujourd'hui que le soin, l'habileté, l'intelligence sont de première nécessité pour tirer un parti productif de la machine à vapeur; et que ces qualités payent largement le temps et l'argent consacrés pour se les procurer.

Quand on essaye de réaliser un progrès dans l'une ou l'autre de ces directions, ce serait le comble de la folie que de s'imaginer avoir atteint la limite extrême du possible, ou même d'en avoir approché. Si parfois toute amélioration semble désormais impraticable, si tous les efforts tentés pour dépasser les résultats acquis semblent frappés de stérilité, c'est affaire à l'ingénieur de découvrir la vraie nature de l'obstacle qui l'arrête, et, une fois reconnu, de le faire disparaître.

Il y a quelques années, la tendance à faire travailler par détente la vapeur à haute pression fut mise en échec par des expériences qui paraissaient démontrer qu'il y a désavantage positif à pousser la détente au delà de certaines valeurs. En examinant avec attention ces résultats, on voit bien que le fait, vrai en lui-même, ne s'appliquait qu'à des machines construites, comme c'était alors trop souvent le cas, au mépris de tous les principes impliqués par ce mode d'emploi de la vapeur, au mépris des précautions

qui sont indispensables pour réaliser les avantages annoncés par les considérations scientifiques. Ces obstacles sont d'ordre mécanique, et c'est au mécanicien à les écarter.

Nous avons à faire une dernière observation : elle s'adresse surtout à l'ingénieur qui veut marcher dans la voie du progrès, et suivre cette évolution nouvelle, que nous voyons s'accomplir et dont on ne saurait méconnaître l'importance; il s'agit de la modification que subit la machine à vapeur moderne pour s'adapter avec sécurité et succès aux grandes vitesses de piston et de rotation; nous parlons des vitesses actuelles pratiquées et qui sans nul doute seront largement dépassées dans l'avenir. Théoriquement on ne voit pas de limites connues et définies à l'économie qui doit résulter de l'accroissement de vitesse; quant aux limites imposées par les nécessités pratiques, elles ne cessent de reculer au fur et à mesure que le constructeur devient plus habile, qu'il arrive à une plus grande exactitude d'exécution, qu'il parvient à donner aux organes plus de rigidité, et plus de dureté aux surfaces exposées à l'usure; on peut prévoir dans cette direction un progrès continu et indéfini, qui ne peut présenter que des avantages, dans quelque sens que puissent s'effectuer d'autres modifications, sans même en excepter l'abandon absolu du type de machine aujourd'hui en usage.

Il est évident que cette adaptation de la machine à vapeur aux grandes vitesses de piston est le problème qui s'impose aujourd'hui à l'ingénieur. Les conditions essentielles au succès sont évidentes et nous pouvons brièvement les résumer comme il suit :

1° Extrême exactitude des proportions;

2° Précision parfaite dans l'ajustage des organes;

3° Symétrie absolue des coussinets;

4° Large étendue et dureté maximum des surfaces frottantes;

5° Graissage abondant, continu et assuré;

6° Tous les organes à mouvement alternatif rigoureusement équilibrés;

7° Précautions spéciales contre les chocs, qu'ils soient

dus à la présence de l'eau dans le cylindre ou au jeu trop lâche des pièces en mouvement;

8° Détente par un mécanisme à « mouvement positif »[1];

9° Régulateur puissant, mais sensible, fonctionnant avec précision, et commandant la détente[2].

10° Distributeurs bien équilibrés, avec commande sans perte de travail;

11° Faibles espaces nuisibles, avance à l'échappement et, sans doute, compression considérable.

Il semble à peu près certain que la distribution, par déclenchement sera tôt ou tard abandonnée; on pourra retarder encore longtemps cette modification, qui paraît inévitable, en substituant, pour fermer le distributeur, des ressorts ou la pression de la vapeur au simple effet de la pesanteur. La « machine de l'avenir » ne sera probablement pas une « machine à détente par déclenchement ».

En ce qui concerne la construction de la machine, considérée comme appareil mécanique, les principes et les règles d'une bonne pratique sont absolument les mêmes, qu'il s'agisse du type *compound*, ou du type ordinaire. La seule particularité spéciale au système *compound*, c'est la nécessité de proportionner les deux machines l'une à l'autre, de manière à en former réellement un seul tout, en répartissant le travail entre elles d'une façon à peu près égale; c'est là un point qui doit être soigneusement étudié. Pour les deux sortes de machines, les moyens les plus propres à assurer le succès peuvent se formuler comme il suit:

1° Il faut d'abord de bons dessins, par quoi on doit entendre :

a. Des proportions correctes tant dans les dimensions

1. Par opposition au mouvement du distributeur obtenu par *déclenchement*. (*N. du Trad.*)

2. L'auteur ne se prononce pas d'une manière absolue sur ce dernier point. Il est possible qu'on trouve plus économique et plus satisfaisant, en définitive, de régler la détente par un appareil automatique, dont les mouvements dépendent de la pression de la vapeur, et d'uniformiser la vitesse en faisant agir autrement le régulateur. L'auteur a imaginé plusieurs dispositifs dans cet ordre d'idées.

générales que dans l'agencement des parties, et, pour tous les organes, des formes et dimensions qui leur permettent de résister sûrement aux efforts auxquels ils peuvent être exposés;

b. Une disposition d'ensemble conforme aux règles qu'une saine pratique a fait admettre;

c. L'adaptation de la machine, comme dimension et puissance, à la besogne spéciale qu'elle est destinée à accomplir. Il arrive parfois que les exigences de la pratique conduisent à sacrifier l'économie de combustible.

2° Il faut ensuite une bonne construction, ce qui implique :

a. L'emploi de bons matériaux;

b. Une exécution soignée;

c. Un ajustage et un montage précis.

3° Une connexité complète entre la machine et son travail, afin qu'elle puisse l'exécuter dans les conditions prévues.

4° Enfin une conduite habile de la part du chauffeur et du mécanicien.

En général, on peut dire que, pour assurer le maximum d'effet utile, la vapeur doit être employée à aussi haute pression que possible, et que la détente doit être prolongée jusqu'au point au delà duquel elle cesserait d'être économique, eu égard à la pression à la chaudière[1]. Il y a même moins d'inconvénients à dépasser ce point qu'à couper la vapeur trop tôt. Une détente considérable entraîne l'emploi de la chemise de vapeur et d'une surchauffe modérée, pour combattre des pertes excessives par condensation intérieure et revaporisation ; l'expansion doit se faire dans deux cylindres, sinon les organes deviennent très lourds, les mouvements irréguliers et les frottements considérables.

Les surfaces extérieures doivent être soigneusement

1. Dans les machines à un cylindre à haute pression, l'indice de détente correspondant à la marche la plus économique, est représenté à peu près par la formule $\frac{1}{2}\sqrt{P}$, dans laquelle P est la pression en livre par pouce carré; il dépasse rarement $0{,}75\sqrt{P}$. Ces chiffres peuvent être augmentés pour les machines à deux cylindres.

garanties par des substances isolantes contre les pertes de chaleur par rayonnemeut et conductibilité. Il est surtout nécessaire de réduire la contre-pression et d'obtenir un vide très complet, sans surcharger la pompe à air, si l'on veut que la détente produise son maximum d'effet; et il devient alors indispensable que les espaces nuisibles soient très réduits et la distribution bien étanche.

La vitesse du piston sera la plus grande qu'on puisse lui donner sans danger.

La détente doit être simple. Le mieux est peut-être qu'elle soit commandée par le régulateur. L'admission doit se fermer rapidement, mais sans choc, et le tiroir doit être équilibré, ou bien organisé de telle sorte que son mouvement soit facile, et qu'il ne soit pas exposé au grippement ou à l'usure.

L'action du régulateur doit être prompte et efficace ; il ne faut pas que le régulateur oscille, ce qui amènerait des irrégularités de marche souvent plus nuisibles que celles qu'il est chargé de prévenir

Le frottement doit être réduit autant que possible, et toutes les précautions prises pour économiser les lubrifiants autant que le combustible.

Les principes de la construction des chaudières sont extrêmement simples, et, quoique des essais soient tentés chaque jour pour en obtenir de meilleurs résultats, en variant la forme et la disposition de la surface de chauffe, les meilleures chaudières de presque tous les bons constructeurs sont, dans la pratique, d'une valeur égale, en dépit de leurs formes très diverses.

Dans l'établissement d'un générateur, l'ingénieur doit évidemment s'efforcer d'atteindre les résultats suivants :

1° Combustion complète sans excès d'air;

2° Température du foyer aussi élevée que possible ;

3° Surfaces de chauffe disposées de telle façon que, sans nuire au tirage, la chaleur disponible soit complètement utilisée;

4° Formes simples, ne comportant ni difficultés d'exécution, ni dépenses exagérées;

5° Dispositions étudiées de façon que la chaudière soit de longue durée, malgré l'action destructive des gaz chauds et de l'atmosphère;

6° Toutes les parties seront facilement accessibles pour les nettoyages et réparations;

7° Elles auront toutes une solidité aussi uniforme que possible, et à peu près les mêmes chances d'usure, de manière que la chaudière, devenue vieille, ne soit pas mise hors de service pour un simple défaut local;

8° Les calculs de résistance seront établis en ménageant un coefficient de sécurité convenable;

9° La chaudière sera munie de soupapes de sûreté, tubes de niveau et autres accessoires en bon état de fonctionnement;

10° Elle sera conduite par des hommes intelligents et très soigneux.

Pour obtenir une combustion complète, le premier de ces *desiderata*, il faut que l'air afflue en quantité suffisante et soit intimement mélangé avec les éléments combustibles. Pour réaliser la seconde condition, température élevée du foyer, il est nécessaire que la quantité d'air fournie ne dépasse pas ce qui est strictement indispensable. Le rendement d'une chaudière en chaleur disponible est mesurée par l'expression :

$$E = \frac{T - T'}{T - t};$$

dans laquelle E représente le rapport de la chaleur utilisée à la quantité totale développée par le combustible; T la température du foyer; T′ celle de la cheminée; t celle de l'air extérieur. Plus haute est la température du foyer, plus basse est celle de la cheminée et plus grande est la proportion de chaleur utilisable. Il est d'autre part évident que, si parfaite que soit la combustion, la chaleur ne peut plus être utilisée lorsque la température de la cheminée se rapproche de celle du foyer ou bien lorsque, par la diffusion des gaz dans une trop grande masse d'air, la température du foyer se rapproche de celle de la chaudière.

Pour concentrer une grande chaleur dans le foyer, on a recours dans certains cas à des expédients particuliers, tels que l'alimentation avec de l'air chaud, ou bien, comme dans les foyers à gaz de Siemens, le chauffage simultané des gaz combustibles et de l'élément comburant. Les foyers spéciaux en briques réfractaires ont un avantage sur les boîtes à feu en métal, par suite de leur plus haute température. Disposer autour du feu des surfaces non conductrices et fortement échauffées, est un moyen très efficace pour obtenir une haute température de foyer.

Dans l'agencement de la surface de chauffage, on doit s'efforcer de ne pas gêner le tirage et d'assurer à l'eau de la chaudière une circulation libre et rapide, en tous les points touchés par les gaz de la combustion. Les parcours des gaz et de l'eau, de part et d'autre de la tôle, doivent autant que possible se faire en sens opposés. L'eau froide doit entrer près de la sortie des gaz refroidis, et la prise de vapeur être éloignée de ce point. La température des gaz de la cheminée a pu être ainsi réduite dans la pratique à moins de 300° Fahr. (148° cent.) ; et l'on est arrivé à des rendements à 75 ou 0,80 de la quantité de chaleur théorique.

Avec de bonnes formes de chaudière, c'est simplement l'étendue de la surface de chauffe qui détermine la quotité de ce rendement, et la diposition de cette surface n'influe que rarement d'une manière notable. L'étendue même de cette surface peut varier entre des limites éloignées, sans que le rendement en soit notablement affecté. Quant aux dimensions relatives de la surface de chauffe et la surface de grille, les rapports de 25 à 1 pour les chaudières à carneaux, et de 30 à 1 pour celles à tubes, sont généralement adoptés par les constructeurs les plus connus.

Les chaudières doivent être faites en fer souple et malléable, ou mieux en acier doux, contenant assez de carbone pour permettre la fusion au creuset ou sur sole, et pas assez pour qu'on ait à craindre la trempe ou le criquement du métal sous l'action de changements de température brusques et considérables.

Quand on emploie le fer, il doit être un peu dur, mais

homogène et souple, pour les parois de la boîte à feu et toutes les parties directement exposées aux flammes.

Le coefficient de sécurité est toujours trop bas en Amérique et n'est jamais trop haut en Europe. Les constructeurs étrangers sont plus soigneux sous ce rapport que nos fabricants des États-Unis. La chaudière doit être construite assez solidement pour supporter une pression au moins six fois égale à celle qu'on se propose d'employer. Et, comme elle s'affaiblit en vieillissant, elle devrait de temps à autre être éprouvée à une pression bien supérieure à celle à laquelle elle doit fonctionner; cette dernière devrait même être réduite peu à peu pour rester dans les limites de sécurité voulues.

Aux États-Unis, le coefficient de sécurité est rarement au-dessus de quatre, dans les chaudières neuves, et même il descend dans la pratique à 1 1/3, par l'effet de nos lois d'inspection.

Les principes que nous venons d'énoncer sont généralement, et peut-être universellement acceptés; on les retrouve dans tous les manuels sur la science et l'art du mécanicien; ils sont admis par les praticiens aussi bien que par les savants.

Ces principes sont exacts, et les conséquences que nous en avons tirées sont rigoureusement correctes, quand on les applique aux divers types de machines thermiques en usage. Ils nous permettent de déterminer, dans tous les cas, le module d'efficacité de la machine, c'est-à-dire le rapport de son rendement réel à celui qu'elle aurait, si elle était entièrement exempte de pertes de chaleur par conductibilité ou rayonnement, comme de toutes autres pertes de chaleur ou de force résultant du frottement des organes ou des chocs.

Les meilleures machines marines modernes du système *compound* ne dépensent parfois, comme nous l'avons vu, que 2 livres de charbon par cheval et par heure; ce n'est guère que le dixième du travail équivalant à la chaleur que renferme le combustible. La différence se répartit comme il suit : 70 pour 100 entraînés par la vapeur ex-

pulsée; 20 pour 100 perdus par conductibilité et rayonnement, par les défauts du mécanisme et des dispositions de la machine; 10 pour 100 seulement sont utilisés. Les trente centièmes de la chaleur dégagée dans le foyer sont habituellement perdus par la cheminée; le surplus entre dans la machine, mais nous n'en pouvons utiliser que 20 pour 100 au plus; c'est de cette faible fraction qu'il faut chercher à économiser quelque partie, en perfectionnant le meilleur type de machine à vapeur existant aujourd'hui. Nous avons indiqué la façon dont l'ingénieur doit s'y prendre pour essayer de réaliser cette économie.

FIN DU TOME SECOND

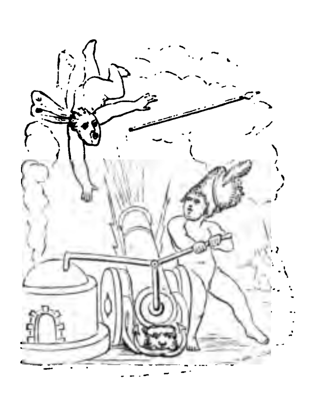


TABLE DES MATIÈRES

TOME PREMIER.

TOME DEUXIÈME.